

Analiza procesu gięcia stalowego płaskownika za pomocą giętarki trójrolkowej

PAWEŁ LONKWIC, IRENEUSZ USYDUS *

W artykule zaprezentowano rezultaty analizy procesu gięcia profilu stalowego w postaci płaskownika na giętarcie trójrolkowej. W części teoretycznej zawarte zostały obowiązujące modele matematyczne opisujące zależność przemieszczenia górnej rolki giętarki w kontekście wymaganego promienia gięcia kształtowanego profilu. W dalszej części przedstawiony został sposób szacowania przemieszczenia rolki z uwzględnieniem współczynnika korekcji. Wyznaczono teoretyczne promienie gięcia dla określonych wartości przemieszczeń rolki. Na tej podstawie opracowano krzywą doświadczalną, na podstawie której można odczytać wartość przemieszczenia rolki dla pośrednich wartości promienia gięcia.

WSTĘP

Gięcie blach z kutego żelaza w wyniku przepuszczania blachy przez zestaw walców datuje się na koniec XVIII wieku, kiedy to w latach 80-tych tegoż wieku angielski „mistrz żelaza” Henry Cort, wywalcował obręcze do beczki.

Giętarki – początkowo niewielkie, obsługiwane były ręcznie lub w bardziej zaawansowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych – za pomocą ręcznie obsługiwanych przrutek. Wykorzystanie silnika parowego przy walcowaniu blach było pierwszym krokiem milowym w tej technologii wytwarzania. Silniki

parowe za pomocą pędni przekazywały moc z silnika do maszyny. Zanim rozpowszechniono użycie silników parowych, maszyny były zasilane za pomocą pracy rąk ludzkich, zwierząt pociągowych lub wiatru [7].

Obecne giętarki trójrolkowe napędzane silnikami elektrycznymi za pomocą przekładni, sterowane są numerycznie. Wykorzystywane są do kształtowania zarówno profili o przekrojach regularnych jak i nieregularnych. Autorzy w literaturze opisują różne zagadnienia związane z tą technologią wytwarzania. W publikacji [12] Autorzy przedstawili analizę wpływu zmiany kąta kształtującego θ na wartości parametrów siłowych w procesie walcowania skośnego. Przeprowadzona symulacja numeryczna kształtowania odkuwki stopniowanego walcu umożliwiła przedstawienie rozkładów siły promieniowej i osiowej, jak również rozkładu momentu obrotowego działających na rolkę stożkową w zależności od ustalonego kąta kształtującego θ . Autorzy w publikacji [2] zaprezentowali wyniki badań własnych, które dotyczyły kształtowania poprzez gięcie wyciskanych wyrobów w postaci profili aluminiowych o nieregularnym kształcie. Badania przepro-



Rys. 1. Typowe rozwiązania giętarek trójrolkowych z pionowym położeniem walców [3, 8]

* Dr inż. Paweł Lonkwic, plonkwic@gmail.com, dr inż. Ireneusz Usydus – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie, ul. Poczтовая 54, 22-100 Chełm.

wadzano w celu uzyskania symetrycznego wygięcia profilu na wysokość 40 ± 10 mm. Symulacje komputerową przeprowadzono w programie Simufact Forming. Otrzymane wyniki symulacji zostały zwalidowane w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzono badania gięcia trójrolkowego na giętarnie do rur i profili z dociskiem hydraulicznym firmy CORMAK HRBM 50HV. W artykule [1] zaprezentowano analityczny i empiryczny model do określenia położenia górnej rolki jako funkcji pożądanego (końcowego) promienia krzywizny dla trójrolkowego zginania płyt, z uwzględnieniem przesunięcia punktu styku na



Rys. 2. Trójrolkowa giętarka z pionowym usytuowaniem osi rolek [9]

gięcia (promień, średnica rolek), które wpływają na gabaryty obrabiarki oraz to, że w większości przypadków kształt walców musi odpowiadać kształtowanemu profilowi. Ten drugi aspekt powoduje, że opłacalność tej metody jest również uzależniona od liczności produkcji.

W związku z powyższym, aby technologia walcowania miała sens ekonomiczny, należałoby stosować ją do dużej partii produkcyjnej oraz przy wykorzystaniu standardowych wałów. Na rynku istnieje wiele rozwiązań mniej lub bardziej zaawansowanych w tym zakresie. Na rys. 1 pokazane zostały typowe rozwiązania giętarek trójrol-



Rys. 3. Ręczna giętarka trójrolkowa [4]



Rys. 4. Ręczna giętarka trójrolkowa, wykonana we własnym zakresie [5]

styku dolnej rolki z płytą. Autorzy w swoich badaniach wykorzystali metodę najmniejszych kwadratów oraz metodę korekcji różnicowej. Do wygenerowanych danych, opracowali zależność matematyczną pozwalającą określić położenie górnej rolki. Wyniki otrzymane wykorzystując opisaną w artykule zależność, zostały porównane z wartościami otrzymanymi z eksperymentu wykonanego na trójrolkowej maszynie do gięcia płyt.

W dostępnej literaturze opisano nie tylko technologię, lecz zawiera ona również przegląd istniejących rozwiązań.

W artykule [10] Autor dokonał przeglądu maszyn i urządzeń wykorzystywanych w procesach gięcia rur, profili, drutu oraz sprężyn. Przedstawiono charakterystykę giętarek wybranych producentów dostępnych na rynku polskim. Istniejące urządzenia zostały podzielone na: giętarki trzpieniowe, giętarki beztrzpieniowe, giętarki trójrolkowe oraz giętarki do formowania drutu i kształtowania sprężyn.

Walcowanie trójrolkowe wykorzystywane w przemyśle odgrywa dużą rolę z uwagi na dostępność tej technologii. Ograniczeniem jej są jednak parametry

kowych z pionowym położeniem wałków. Wraz z ich rozwojem powstały inne rozwiązania, których zasada działania opiera się o te same założenia, ale ich konstrukcja jest inna, np. z pionowym położeniem osi wałków – rys. 2. Oprócz maszyn pokazanych na rysunkach 1 i 2, można spotkać giętarki ręczne, której konstrukcję pokazano na rys. 3.

Pokazane na rysunkach 1÷3 rozwiązania są rozwiązaniami handlowymi. Jednak z racji ograniczenia kosztów oraz własnych przekonań, zwłaszcza małych przedsiębiorców, można spot-



kać tzw. samoróbki, czyli maszyny wykonane we własnym zakresie, dla własnych potrzeb. Rozwiązania takie często charakteryzują się masywniejszą budową w porównaniu do rozwiązań handlowych – rys. 4.

MODELE OPISUJĄCE PROMIEŃ GIĘCIA Kształtowanego profilu

W artykule [1] Autorzy zaprezentowali trzy modele matematyczne opisujące promień gięcia kształtowanego profilu R .

$$\frac{a^2}{2} + (R - U)^2 = R^2 \quad (1)$$

Zmienne opisane we wzorze (1) są ściśle powiązane z modelem geometrycznym walca górnego, pokazanym na rysunku 5.

Inne ujęcie zostało zaprezentowane w modelu geometrycznym zaprezentowanym na rys. 6, w którym uwzględniono walec podpierający.

W tym przypadku, wzór (2) opisujący przemieszczenie rolki górnej U , zaprezentowany został przez Autorów w publikacji [1] w następującej formie:

$$U^2 - [2 \cdot (R + J \cdot G)] \cdot U + [X^2 + (R + G \cdot J)^2 - R^2] = 0 \quad (2)$$

Trzeci model geometryczny, na podstawie którego opisano przesunięcie rolki górnej U wzorem (3) został pokazany na rysunku 7.

$$U = \frac{G^n \cdot (n + 2) \cdot E}{2 \cdot R_f \cdot (4 \cdot G^{n-1} \cdot (n + 2) \cdot E - 3 \cdot K' \cdot t^{n-1} \cdot U^{n-1} \cdot (1 - v^2) \cdot 2^{2n}} \quad (3)$$

Wszystkie opisane powyżej trzy modele matematyczne w praktyce nie dają zbieżnych wyników, a uzyskane przy ich wykorzystaniu rezultaty różnią się od kilku do kilkunastu procent, z uwagi na to, że do teoretycznych obliczeń przyjmowany jest idealny stan materiałowy [1].

Z uwagi na powyższe, istotnym elementem szacowania rzeczywistego ugięcia kształtowanego profilu na walcach trójrolkowej jest współczynnik korekcji, który należy uwzględnić po obliczeniu przemieszczenia teoretycznego U_t , na podstawie wzoru (4), który uwzględnia oczekiwany promień gięcia R oraz geometrię walcarki.

$$U_t = \frac{D}{2} + t + R - \left[\left(\frac{D}{2} + t + R \right)^2 - \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

gdzie:

U_t – teoretyczne przemieszczenie rolki górnej, [mm]

D – średnica rolek zewnętrznych, [mm]

d – średnica rolki środkowej, [mm]

t – grubość materiału, [mm]

R – oczekiwany promień wyrobu, [mm]

a – odległość pomiędzy rolkami zewnętrznymi, [mm]

Model geometryczny walców w rozpatrywanym przypadku przedstawiony został na rys. 8. W modelu przyjęto założenia,

reklama

Key to Markets
Messe Stuttgart

Serce branży obróbki metalu bije w Stuttgarcie!

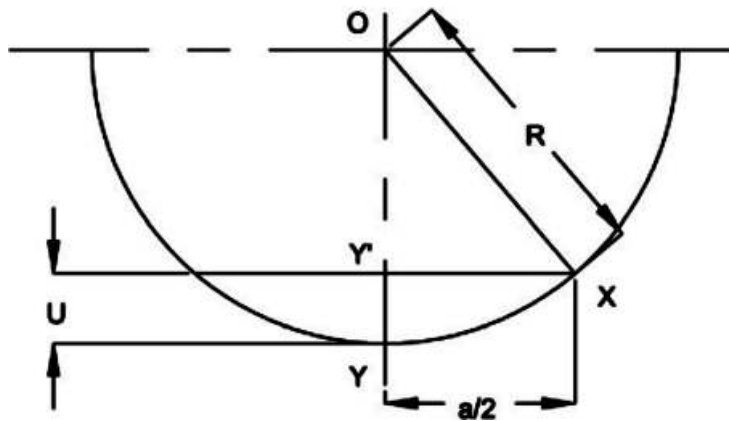
ZAREZERWUJ BILET
JUŻ
TERAZ!

**International Exhibition
for Metal Working**

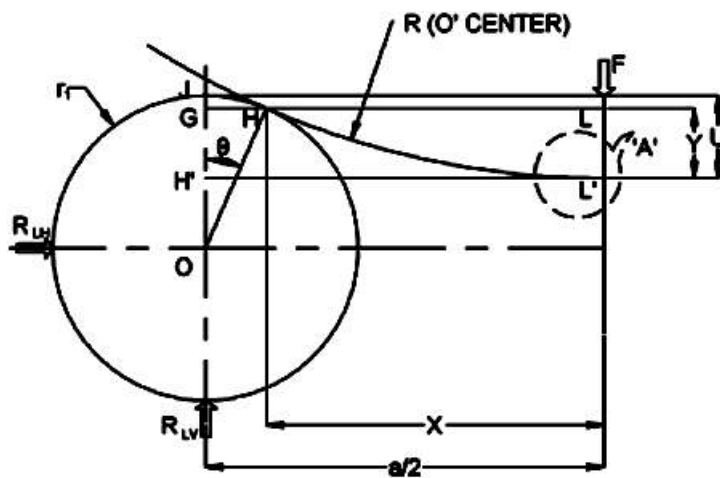
**10 - 14 Sep 2024
Messe Stuttgart
Germany**

Follow us on social media

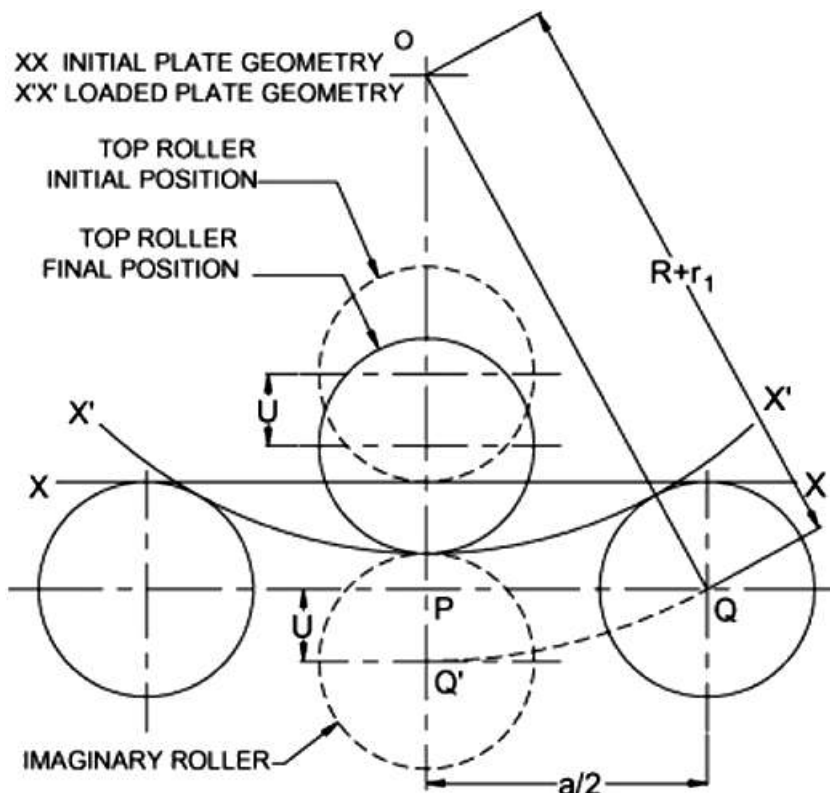
#AMBexpo
amb-expo.de



Rys. 5. Model geometryczny walca gnącego [1]



Rys. 6. Model geometryczny walca podpierającego [1]



Rys. 7. Model geometryczny walców w walcarni trójrolkowej [1]

że dolne walce podpierające są nieruchomymi podporami, natomiast górny walec ma możliwość pionowego przemieszczania się o wartość U_t .

Na podstawie znajomości geometrii maszyny, w pierwszej kolejności należy wykonać obliczenia teoretycznego przemieszczenia rolki górnej U_t dla oczekiwanego promienia wyrobu R . Z uwagi na to, że kształtowany materiał posiada swoją indywidualną charakterystykę struktury materiałowej, uzyskuje się promień R_t (różniący się co do wartości od promienia oczekiwanego R), który następnie podstawia się do wzoru (4), obliczając przemieszczenie rolki U_t .

$$x = U_t - U_t \quad (5)$$

Na podstawie obliczonego U_t oraz uzyskanego doświadczalnie U_t przemieszczenia, oblicza się wartość współczynnika korekcji x (wzór 5). Wartość ta określa, o ile należy zmienić teoretyczne przemieszczenie rolki U_t , aby uzyskać wymagany promień gięcia R . Zatem ostatecznie, wartość przemieszczenia rolki U jest sumą wartości przemieszczenia teoretycznego U_t oraz współczynnika korekcji x (6):

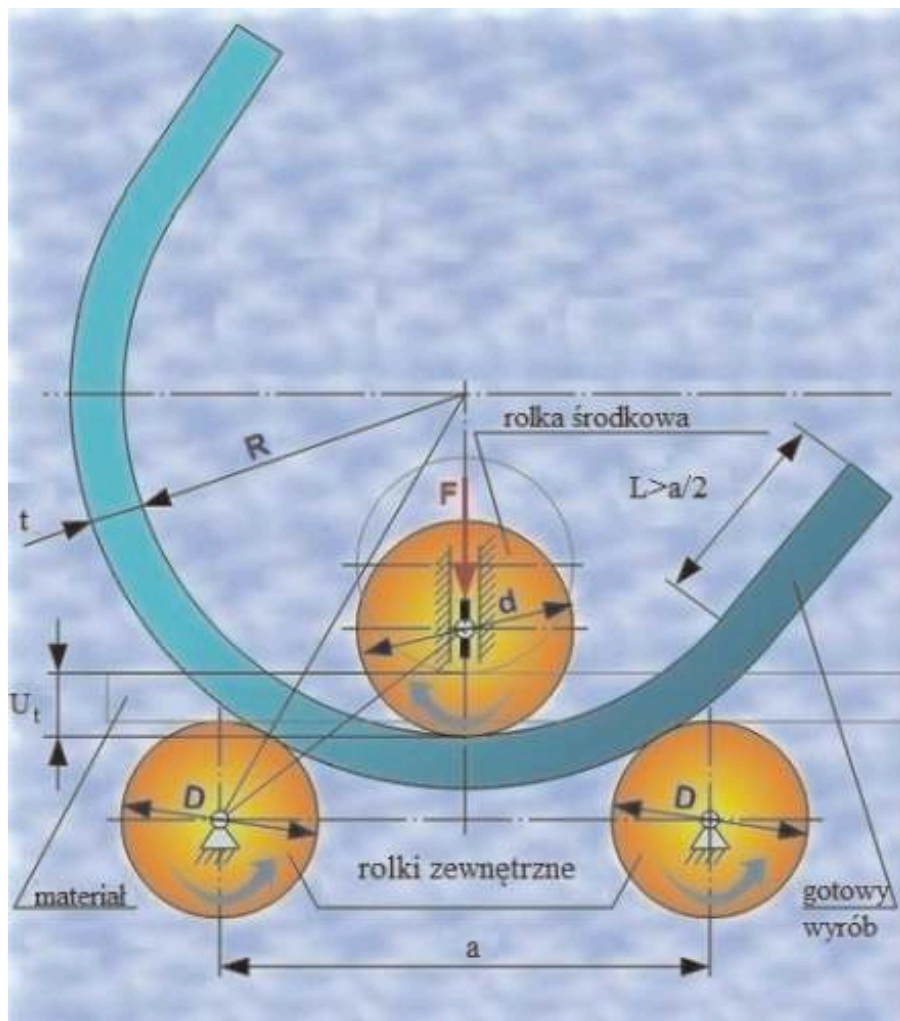
$$U = U_t + x \quad (6)$$

Powyższa metoda jest słuszna, przy doborze parametrów kształtowania dla większej ilości detali, jakie chcemy kształtować w partii produkcyjnej. Mimo tego, zaleca się dokonywać przeliczeń według powyższego schematu z uwagi na to, że w jednej partii mogą znajdować się profile z różnego okresu produkcyjnego, co może wpływać na zmiany w charakterystyce materiałowej powstałe na etapie wytopu.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Do badań wykorzystano giętarkę trójrolkową z ręcznym dociskiem – rys. 9. Giętarka wyposażona jest w ruchomą rolę 3, której położenie jest sterowane za pomocą pokrętki 1 umocowanego na śrubie 2. Kształtowany profil (nie pokazany na rysunku 6., od spodu podpierany jest za pomocą dwóch rolek 4, a jego prowadzenie podczas kształtowania jest wspomagane wałkami bocznymi 5. Napęd przekazywany jest na dolne rolki za pomo-



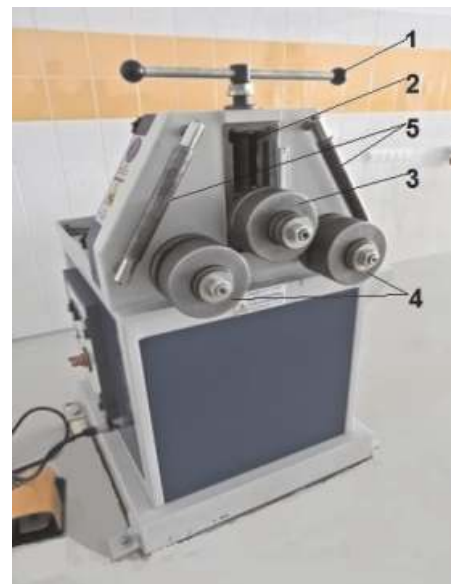


Rys. 8. Model geometryczny układu rolek w walcarki trójrolkowej przyjęty do dalszych analiz [6]

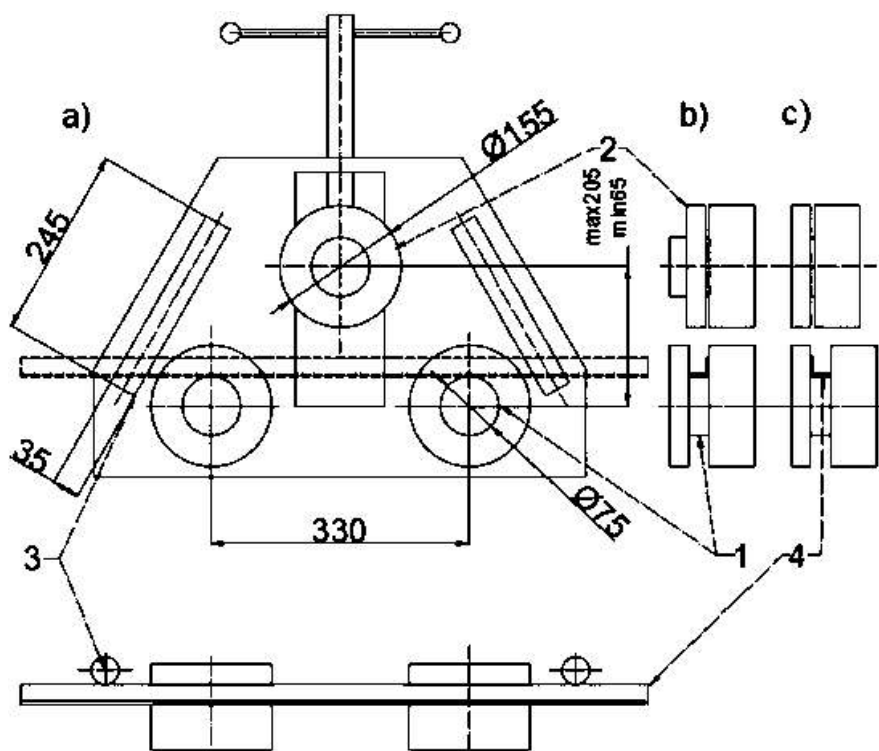
cią przekładni, a sam proces ruchu obrotowego jest sterowany pedałem.

Geometria głównych jej elementów roboczych pokazana została na rysunku 10.

Do badań wykorzystano rolki monolityczne – rys. 11 – o średnicy 130 mm i szerokości 50,5 mm.



Rys. 9. Giętarka trójrolkowa użyta do badań doświadczalnych: 1 – pokrętło, 2 – śruba, 3 – górna rolka dociskowa, 4 – dolne rolki napędowe, 5 – wałki boczne [12]



Rys. 10. Schemat elementów roboczych giętarki użytej do badań: 1 – dolne rolki napędowe, 2 – górna rolka dociskowa, 3 – wałki boczne, 4 – kształtowany profil [12]



Rys. 11. Rolki monolityczne wykorzystane do badań zamontowane na walcarki trójrolkowej z badanym płaskownikiem

WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem 1 metrowych odcinków profili stalowych gatunku S235JR, w formie płaskownika o wymiarach 5 × 50 mm. Dla każdego przemieszczenia wstępnego wykonano po trzy próby. W Tabeli 1 przedstawiono wartości średnie promienia gięcia. Kształtowanie łuku dla przemieszczeń rolki o 10, 15 i 20 mm wykonano w procesie jednostopniowym, oraz – ze względu na poślizgi materiału, dla przemieszczeń 40 i 60 mm w procesie wielostopniowym co 20 mm.

Na rysunku 12 pokazane zostały wyniki kształtowania płaskownika dla jednej z serii przemieszczenia rolki środkowej.

Uzyskane wyniki doświadczalne posłużyły do opracowania wykresu – rys. 13.

Jak można zauważyć zależność ta ma charakter krzywoliniowy i można ją opisać funkcją potęgową (7):

$$R = 135926 \cdot U^{-1.663} \quad (7)$$

gdzie: R – promień gięcia, U – przemieszczenie wstępne.

Z praktycznego punktu widzenia korzystnie jest wyznaczyć zależność odwrotną tzn. zależność przemieszczenia wstępnego od promienia ugięcia – zależność (8):

$$U = 943.96 \cdot R^{-0.562} \quad (8)$$

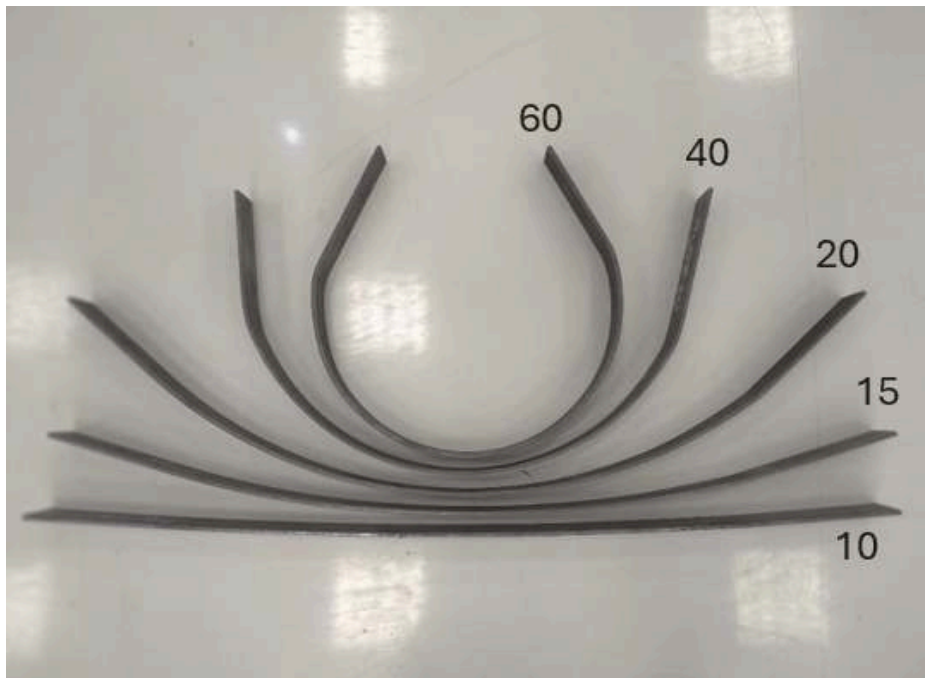
Funkcja pozwala obliczyć wartość przemieszczenia wstępnego jakie należy zastosować, aby uzyskać oczekiwany promień gięcia.

ANALIZA TEORETYCZNA

W celu porównania wyników badań eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi z obliczeń teoretycznych, na podstawie wzoru (4) obliczono teoretyczne przemieszczenie wstępne U_t . Następnie obliczono współczynnik korekcji x , o który należy skorygować obliczone teoretyczne położenie rolki górnej, aby uzyskać wartość promienia jaki uzyskano w doświadczeniu (Tabela 2). Z uzyskanych obliczeń wynika, że wartość współczynnika korekcji jest wartością zmienną także co do

Tabela 1. Wyniki badań doświadczalnych dla płaskownika $\neq 5 \times 50$ mm [11]

Liczba przemieszczeń rolki	Całkowite przemieszczenie wstępne, doświadczalne	Uzyskany promień gięcia
$N \times U_i$ [mm]	U [mm]	R [mm]
1 x 10	10	4415,24
1 x 15	15	1241,02
1 x 20	20	629,35
2 x 20	40	281,25
3 x 20	60	189,46



Rys. 12. Wyprofilowane płaskowniki uzyskane przy parametrach zawartych w Tabeli 1

znaku, ponadto jego wartość nie przyrasta liniowo w stosunku do zmiany położenia rolki górnej w giętarcie.

Na podstawie danych zawartych w Tabeli 2, opracowany został wykres – rys. 14.

Uzyskana krzywa pozwala na odczytanie teoretycznego przemieszczenia rolki środkowej dla wartości promienia nie wykorzystywanego w doświadczeniu, bez wykonywania powyższych obliczeń.

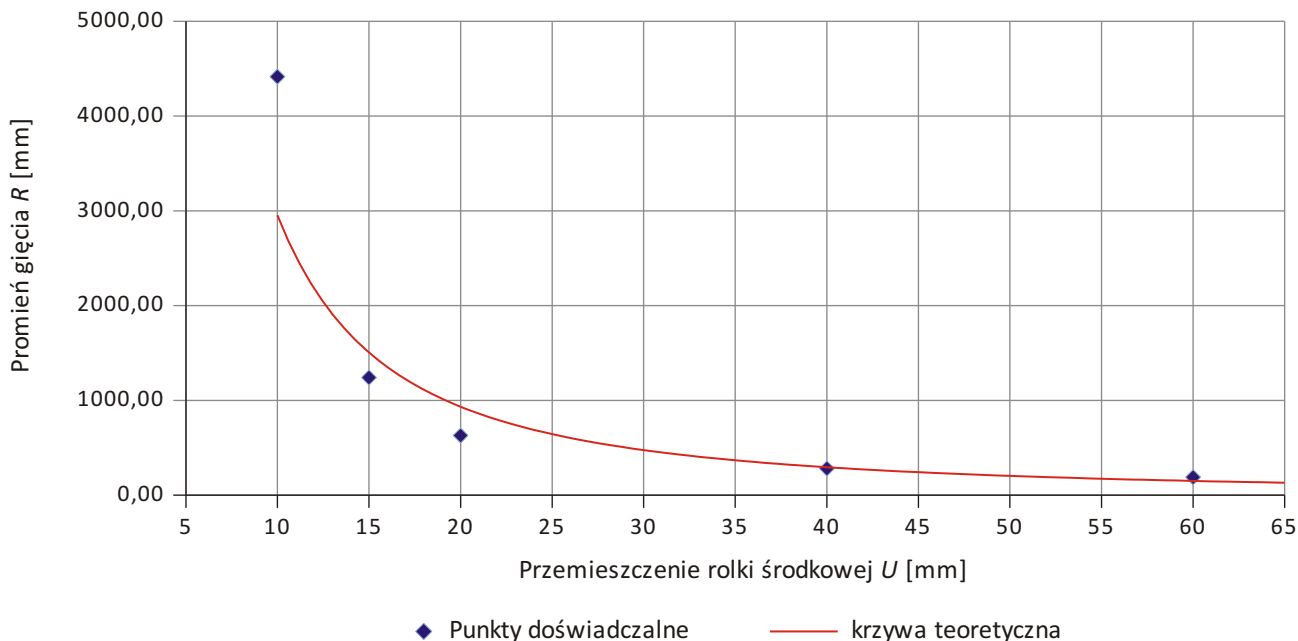
Na rysunku 15 pokazano różnice pomiędzy teoretycznymi wartościami przemieszczenia rolki (z uwzględnieniem

współczynnika x), a uzyskanymi doświadczalnie. Uzyskana różnica jest wartością korekcji teoretycznego przemieszczenia rolki środkowej.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiza teoretycznych oraz wykonanych badań doświadczalnych sformułowano poniższe wnioski podsumowujące:

– najdokładniejszą metodą wyznaczenia wartości promienia gięcia w funkcji przemieszczenia rolki dla badanych



Rys. 13. Wykres obrazujący zależność uzyskanego promienia gięcia od przemieszczenia wstępnego rolki środkowej [11]

Tabela 2. Wyniki obliczeń teoretycznego ugięcia wstępnego i korekcy dla płaskownika ≠ 5 × 50 mm

Promień gięcia R [mm]	Teoretyczne ugięcie wstępne	Całkowite ugięcie wstępne doświadczalne	Współczynnik korekcy
	U _t [mm]	U _d [mm]	x
4415,24	3,0	10	7,0
1241,02	10,4	15	4,6
629,35	19,7	20	0,3
281,25	41,2	40	-1,2
189,46	59,2	60	0,8

profilu jest metoda doświadczalna. Na podstawie wyznaczonych zależności możliwe jest obliczenie wartości przemieszczenia wstępnego dla dowolnej, prognozowanej krzywizny. Pozwala to przyspieszyć rozpoczęcie procesu produkcyjnego i ogranicza liczbę prób doświadczalnych, które są stosowane w tego typu giętkarkach. Zmniejsza to znacząco koszty wdrożenia;

– zastosowanie współczynnika korekcy jest zasadne dla większej liczby kształtowanych detali;

– wykorzystane wzory do obliczeń przemieszczenia wstępnego nie uwzględ-

niają wielu czynników takich jak: przekrój materiału, wskaźnik przekroju na zginanie, stan materiału, sprężynowanie oraz zastosowanie procesu jedno- lub wielostopniowego;

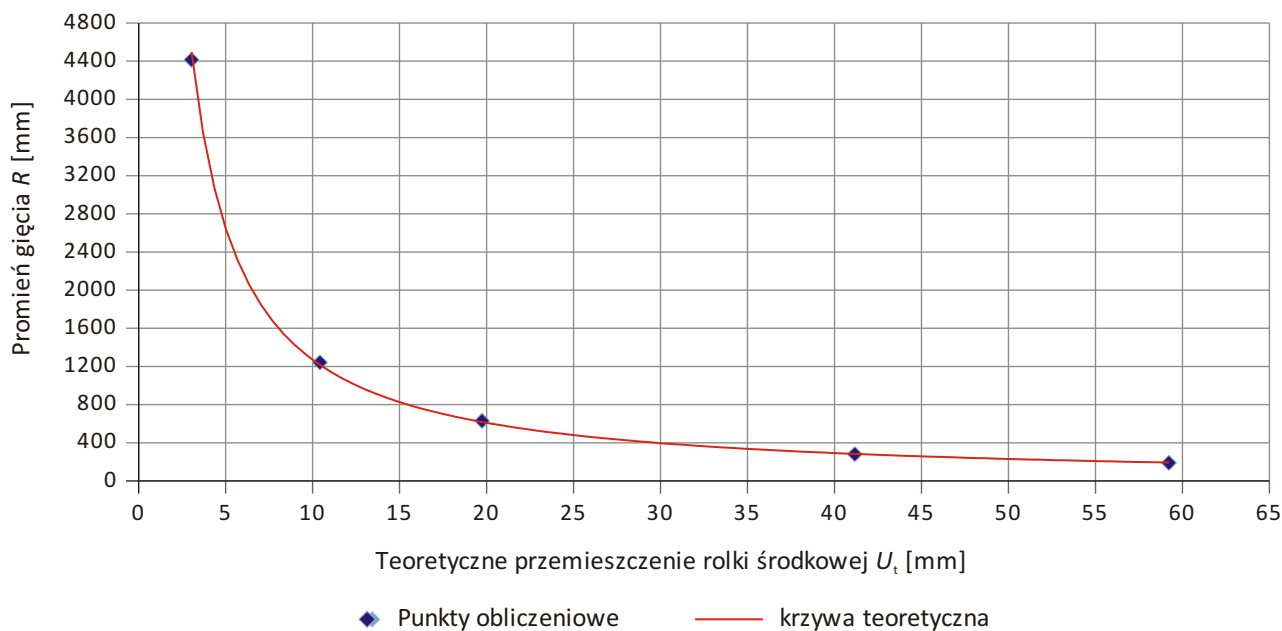
– stosowane wzory analityczne dają wyniki różniące się od wyników doświadczalnych. Zastosowanie współczynnika korekcy pozwala na zmniejszenie liczby prób warsztatowych, co zmniejsza koszty wytworzenia wyrobu gotowego;

– w celu potwierdzenia zasadności przedstawionej metody doboru przemieszczenia rolki górnej walcarki,

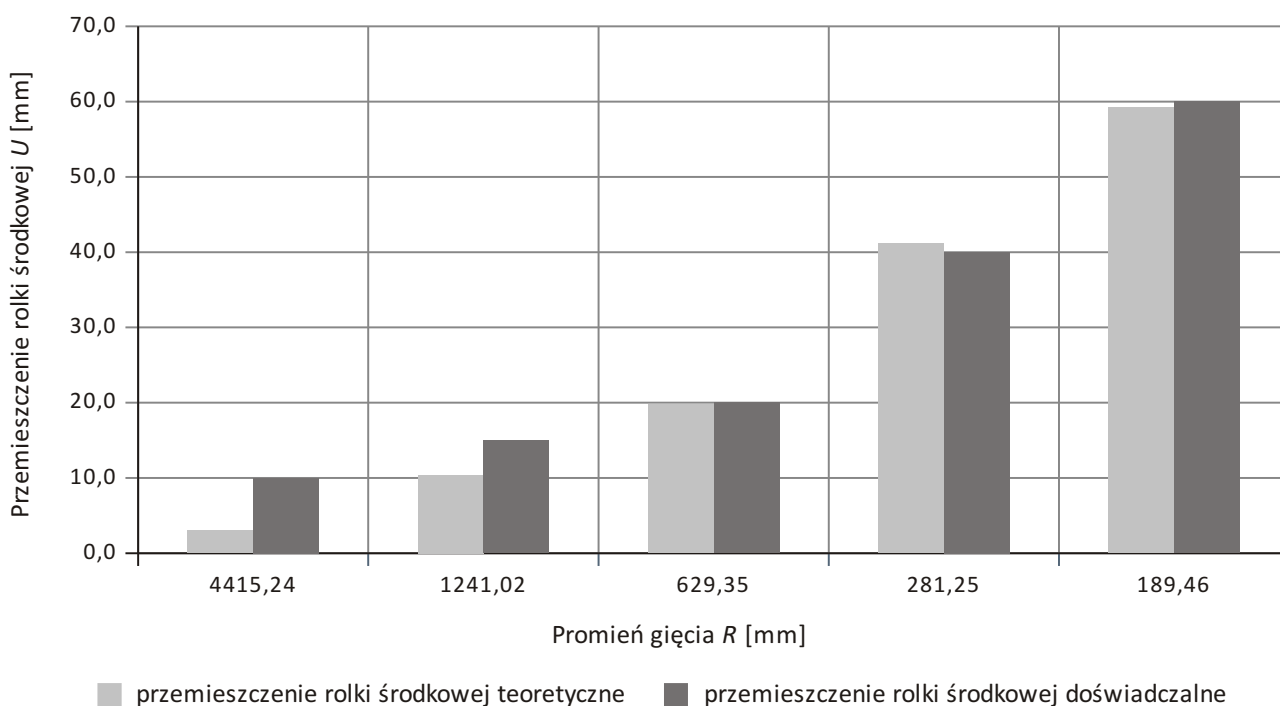
zaleca się przeprowadzenie dalszych badań na innych przekrojach profili.

LITERATURA

1. Gandhi A.H., Raval H.K.: Analytical and empirical modeling of top roller position for three-roller cylindrical bending of plates and its experimental verification. Journal of Materials Processing Technology 197/2008, ss. 268-278.
2. Gądek T., Nowacki Ł., Majewski M., Jurczak H.: Badania gięcia profili aluminiowych stosowanych w przemyśle transportowym. Obróbka Plastyczna Metali XXIX (3) 2018, ss. 299-314.
3. <https://amobpolska.pl/gietarki-trojrolkowe-seria-mam,68,pl> (stan na dzień 23.04.2024).
4. <https://holzmann.pl/produkty/item/3435/Reczna-Gietarka-do-rur-Holzmann-RBM1500> (stan na dzień 23.04.2024).
5. <https://myhouse-it.desiguspro.com/sub/pl/tools/trubogib-dlya-profilnoj-truby-svoimi-rukami> (stan na dzień 23.04.2024).
6. <https://pstech-ukraine.com/a353045-raschet-radiusa-gibki.html> 15-11-2020.
7. <https://www.barnshaws.pl/informacje/artykuly/wspoczesna-historia-projektu>



Rys. 14. Zależność promienia gięcia od teoretycznego przemieszczenia rolki



Rys. 15. Różnice między wartościami przemieszczenia rolki, określonymi bez i z uwzględnieniem współczynnika korekcji

wania-walcarek-i-gięcie-biach-czesc-pierwsza (stan na dzień 23.04.2024).

8. <https://www.maszynypolska.pl/product-pol-61289-Gietarka-trojrolkowa-dorur-i-profilu-srednica-walkow-30-mm-moc-silnika-0-75-kW-02861289.html> (stan na dzień 23.04.2024).

9. <https://www.poltechnik.pl/gietarka-trojrolkowa-akyapak-seria-apk-30-35-45> (stan na dzień 23.04.2024).

10. Tomas P.: Wybrane maszyny i urządzenia stosowane w procesach gięcia. Stal, Metale & Nowe Technologie, nr 1-2/2017, ss. 24-28.

11. Usydus I.: Gięcie na zimno profili w giętarcie trójrolkowej (rozprawa doktorska). Politechnika Lubelska, Lublin 2022.

12. Usydus I., Tofil A., Gontarz A.: Badania wpływu ugięcia wstępnego na promień wyboru w procesie gięcia kątownika na giętarcie trójrolkowej. Hutnik 7/2018, ss. 223-226. ■