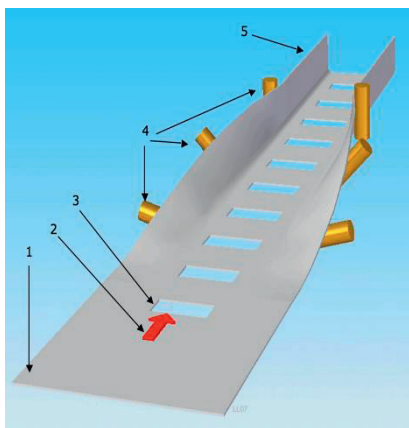


Nowe koncepcje w produkcji i wykorzystaniu profili stalowych

Ze względu na bardzo szerokie zastosowanie produkcja komponentów na bazie profili stalowych jest realizowana w wielu zakładach przemysłowych. Technologia wytwarzania profili stalowych opiera się na gięciu taśm o określonej grubości, realizowanych na specjalnie zaprojektowanych liniach produkcyjnych.



Rys. 1.

1. Schemat procesu kształtowania na rolkach: 1 – taśma, 2 – kierunek ruchu taśmy, 3 – wykrojone otwory, 4 – rolki kształtujące, 5 – końcowy kształt profilu

Kształtowanie na rolkach jest ciągłą technologią realizowaną w temperaturze pokojowej, w której taśma metalu jest gięta wzdłuż osi/kierunku jej ruchu. Zestawy rolek, które wraz z oprzyrządowaniem zwane są stacjami, kształtują materiał w serii przyrostowych etapów aż do uzyskania żądanej konfiguracji przekroju poprzecznego (rys. 1).

Kształtowanie profili na rolkach – krótka charakterystyka

Z powodu stopniowanego, postępującego gięcia nie ma zmian w obszarze przekroju poprzecznego lub są one pomijalne. Linia technologiczna, na której wykonuje się profile stalowe, zawiera w zależności od stopnia zaawansowania od kilku do kilkunastu elementów składowych. Na początku zwykle zainstalowana jest sekcja rozwijania blachy z kręgów i cięcia na odpowiedniej szerokości taśmy, rys. 2a,b. Następnie zaprojektowane są stacje prostowania/wyciągania blachy i wstępnego obrabiania taśmy, np. wykrawania otworów. Kolejnym elementem linii jest sekcja kształtowania profilu składająca się z kilku do nawet kilkudziesięciu stacji rolek, rys. 2c. Na końcu linii przewidziane są operacje cięcia profili na żądany wymiar, a także elementy segregowania i składowania. Kształtowanie na rolkach często nie jest ostatnią operacją linii kształtowania profili. Nierzadko zachodzi konieczność dodania do procesu technologicznego kolejnych operacji. Dzieje się tak dlatego, że brak wszystkich operacji w jednej linii oznacza potrzebę odkładania półproduktów jednej operacji na magazyn do czasu aż zwolnią się moce przerobowe na kolejnej maszynie. W takiej sytuacji potrzeba więcej miejsca na przechowywanie półproduktów oraz wydłuża się czas realizacji zamówień. Efektywniejsze jest zatem automatyzowanie linii i uzupełnianie o kolejne operacje, np. wykrawania, wycinania, spawania, zaciskania, dogniatania, łączenia mechanicznego itp., w zależności od stopnia wykończenia półfabrykatu.

Jednym z najistotniejszych elementów linii jest oczywiście sekcja kształtowania na rolkach. Projektant, ✦

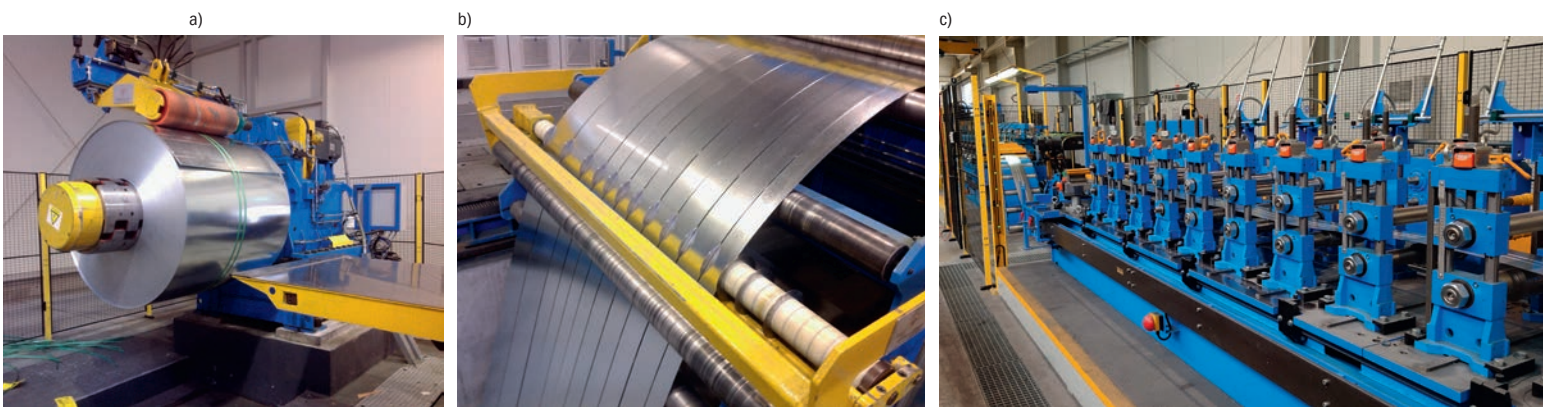
TEKST: DR INŻ. **Robert Cacko**, DR INŻ. **Piotr Czyżewski**,
DR INŻ. **Andrzej Kochański**

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Technologiczny

Mariusz Roznowski

MFO S.A.

zdjęcia: autorzy



Rys. 2.

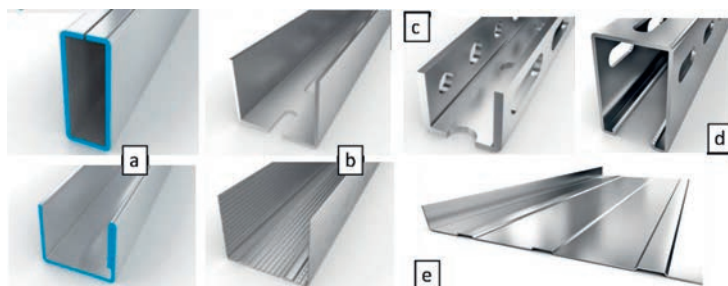
✦ przystępując do projektu stacji, ustala pozycję wyjścia taśmy z ostatnich rolek, a następnie ustala liczbę par walców potrzebnych do każdego gięcia. Zbyt mała liczba przejść spowoduje zniekształcenie w materiale w wyniku skumulowania zbyt dużych naprężeń. Duża liczba stacji natomiast sprawia, że proces staje się nieekonomiczny. Użycie zbyt małej liczby przejść może mieć różne implikacje, np. w postaci:

- zdeformowania gotowego wyrobu,
- kosztownej przeróbki rolek,
- konieczności zaprojektowania kolejnych stacji/rolek,
- dużej ilości odpadu,
- długiego czasu przygotowania.

Linia kształtowania profili na rolkach ma pewne istotne zalety [1]:

- linia produkcyjna może osiągnąć wydajność od ok. 15 do ok. 180 m/min,
- zaginanie na rolkach jest procesem, który pozwala uzyskać powtarzalność przy produkcji wielkoseryjnej,
- można również wykonywać części w produkcji małoseryjnej ze względu na relatywnie krótki czas przeobrażenia,
- cały proces wymaga małej liczby operatorów, co minimalizuje koszty,
- operacje kształtowania mogą być uzupełniane o inne operacje w celu częściowej lub całkowitej automatyzacji produkcji.

Większość prac związanych z procesami kształtowania na rolkach koncentruje się na analizie lokalnej, np. na efektach w strefach, w których występuje gięcie [2-4] lub problemach ogólnych związanych z finalnym profilem, np. efektów odsprężynowania, dokładności wyrobów itp., które mają kluczowe znaczenie w praktyce przemysłowej [5-8]. Jak już wspomniano, profile stalowe mają bardzo szerokie zastosowanie. Można je odnaleźć w niemalże wszystkich branżach przemysłowych. Przykłado-



Rys. 3.

we profile wykorzystywane w gospodarce pokazano na rys. 3.

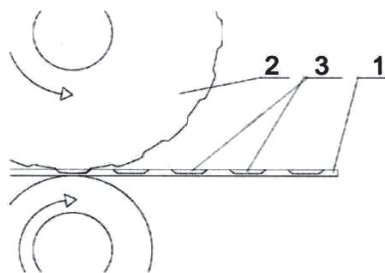
Poszerzanie przez odcinkowe pogłębianie

Szerokość taśmy używanej do procesu kształtowania na rolkach wynika z wymiarów końcowego przekroju profilu. Znane są rozwiązania wytwarzania cienkościennych kształtowników z odkształceniem powierzchniowym, w którym wyjściową taśmę metalową przemieszcza się ruchem postępowym pomiędzy narzędziami obrotowymi wywierającymi moment gnący, kształtujący żądany profil i z równoczesnym przeformowaniem jej na kształtownik. W końcowej fazie tego przeformowania wytłacza się rotacyjnie poprzeczne rowki usztywniające lub na wybranych fragmentach powierzchni wytłacza się fakturę moletowaną w celu ułatwienia wkręcania blachowkrętów oraz stosuje się w wybranych fragmentach powierzchni profilowanie wzdłużnych rowków usztywniających. Stosowane są rozwiązania, w których pomiędzy rotacyjnymi narzędziami prowadzi się gęsto rozlokowane wgniatanie punktowe na obu płaszczyznach, bez zmiany grubości wyjściowej. Znane jest też rozwiązanie, w którym zwiększoną sztywność kształtownika uzyskuje się przez równomiernie rozmieszczenie na całej powierzchni drobnych ✦

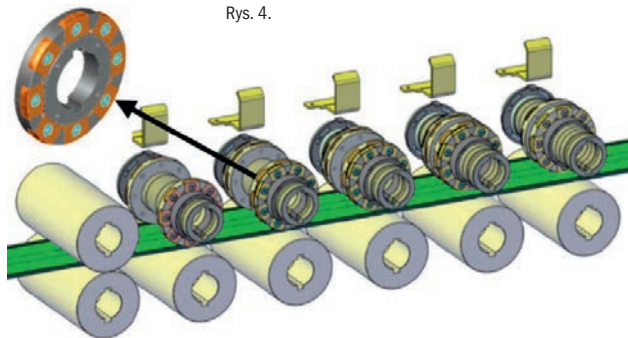
2. Składowe sekcji podawania blachy z kręgu (a) i cięcia blachy na taśmę (b) oraz sekcja rolek kształtujących profil (c) (MFO S.A.)

3. Przykład profili stosowanych w oknach PCV (a), w suchej zabudowie (b), montażu wentylacji i klimatyzacji (c), fotowoltaice (d) oraz w naczepach i zabudowach (e), (materiały MFO)

4. Zasada działania rolki kształtującej – rozszerzającej wstęgi: 1 – taśma, 2 – rolka kształtująca wgłębienia, 3 – cykliczne wgłębienia
 Źródło: Roznowski M., Mirski T.: *Method for obtaining steel sections and the steel section*. PL225443, 2015.



Rys. 4.



Rys. 5.

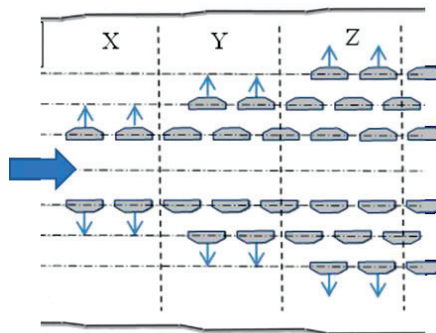
5. Moduł stacji rozszerzających i konstrukcja walca nagniatającego z wymiennymi segmentami
 Źródło: Roznowski M., Mirski T.: *Method for obtaining steel sections and the steel section*. PL225443, 2015.

6. Sposób rozmieszczenia przetłoczeń symetrycznie rozłożonych w stosunku do osi wstęgi blachy kształtownika (zaznaczono strzałką kierunek ruchu taśmy)

7. Model numeryczny procesu nagniatania wgłębień 2D w płaskim stanie naprężenia; a) model numeryczny po optymalizacji: 1 – górny (szytywny) walec, 2 – dolny (szytywny) walec, 3 – siatka elementów skończonych na taśmie; b) wynik ostatniego stadium dociskania ze strefami przemieszczania materiału

❖ przegięć, tworzących falistość wzdłużną i poprzeczną z siatką zagłębień punktowych.

W ramach prowadzonych prac rozwojowych w firmie MFO S.A. zaproponowano metodę specjalnego przygotowania taśmy z wykorzystaniem lokalnych wgłębień, umożliwiającego jej poszerzenie. Opatentowana została technologia umożliwiająca zastosowanie taśmy wyjściowej o szerokości mniejszej niż określona przez standardową procedurę oceny przekroju poprzecznego. Efekt uzyskuje się dzięki serii wstępnych wgniecień prowadzących do rozszerzenia wstępnego pasa. Seria lokalnych wgłębień wykonywana jest na taśmie przed procesem gięcia. Celem zastosowania innowacyjności procesowej było uzyskanie kształtowników



Rys. 6.

stalowych, które cechują się zmniejszoną masą produktu, przy jednoczesnym utrzymaniu lub poprawieniu wybranych własności mechanicznych.

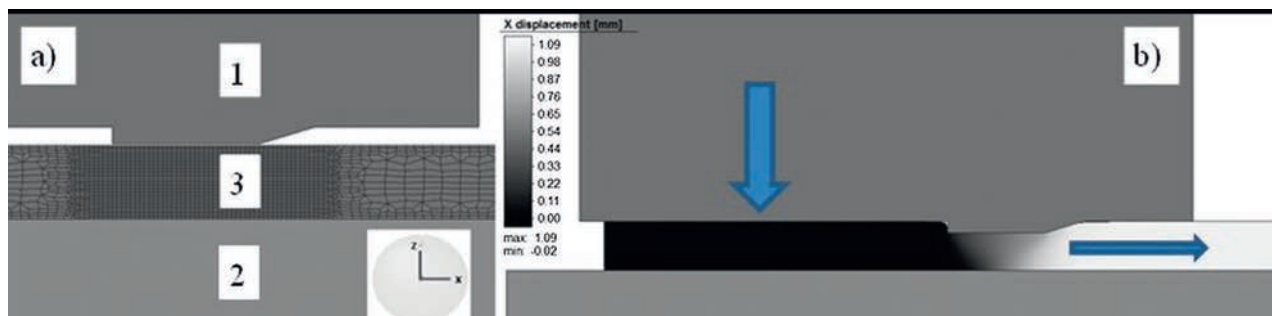
Istota innowacji wytwarzania kształtowników z blach ocynkowanych charakteryzuje się tym, że:

- między rotacyjne narzędzia kształtujące podaje się jednostajnym ruchem ciągłym, odwijaną w tym czasie z bębna, taśmę stalową ocynkowaną – ten etap produkcji jest typowy również dla innych znanych sposobów wytwarzania kształtowników stalowych,
- w obrębie wstęgi kształtownika, równoległe do krawędzi osi wstęgi symetrycznie po jej obu stronach, dokonuje się przetłoczeń rozszerzających (etap ten, polegający na utworzeniu w kształtowniku symetrycznie ułożonych względem osi wstęgi przetłoczeń, jest nową koncepcją – patent PL225443),
- przetłoczenia rozszerzające wstęgę kształtownika wykonywane są za pomocą pary rolek kształtujących (rys. 4), gdzie rolka górna została uzbrojona w elementy kształtujące przetłoczenie, a rolka dolna jest rolką płaską, podpierającą,

Etapy procesu

0	1	2	3	4	5	6
137,00	137,30	137,70	138,10	138,54	138,75	139,20

Tab. 1. Wyniki pomiarów szerokości dla wybranej taśmy po kolejnych etapach wgłębienia, gdzie: 0 – wstęga bez pogłębień, 6 – wstęga z trzema liniami pogłębień (rys. 6)



Rys. 7.

- moduł stacji przetłaczających pokazano na rys. 5, natomiast sposób rozmieszczenia i narastania przetłoczeń na wstędze w trakcie procesu przemieszczenia taśmy pod kolejnymi stacjami pogłębiającymi pokazano na rys. 6,
- kształtownik powstały wskutek operacji przetłaczania jest następnie zaginany do ostatecznego kształtu profilu – standardowa część procesu technologicznego.

Przeprowadzono badania kształtowników wykonanych we wdrożonej technologii wytwarzania profili z przetłoczeniem poszerzającym ze stali DX51. Wykonano pomiary własności mechanicznych konieczne do przeprowadzenia symulacji komputerowych, m.in. określono wytrzymałość na rozciąganie, zakres zmienności wartości umownej granicy plastyczności (norma nie określa wielkości umownej granicy plastyczności) istotny w procesie poszerzania wstęgi przez pogłębianie. Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwoliły na optymalne zaprojektowanie kształtu segmentów kształtujących wgłębiania, rys. 7.

Badania geometrii kształtownika poszerzanego w procesie pogłębiania wykonano na próbkach pobranych z linii technologicznej. Przykładową próbkę do badań po procesie pogłębiania przedstawiono na rys. 8. Na zdjęciu zaznaczono kolejne linie kształtowania przez pogłębianie. Numeracja jest zgodna z kolejnością operacji. W tab. 1 pokazano przykładowe wyniki uzyskanych pomiarów szerokości taśmy dla wybranej wstęgi po kolejnych etapach nagniatania (rys. 6).

Wprowadzenie czynności lokalnego przetłaczania profilu skutkuje poszerzeniem kształtownika w trakcie profilowania kształtownika. Zmiana szerokości sprawia, że w kolejne stacje profilujące wprowadzana jest wstęga o innej niż wyjściowa szerokości. Dynamiczna zmiana szerokości wstęgi musi zostać uwzględniona w projektowaniu narzędzi oraz w określeniu parametrów procesu profilowania. Inną, korzystną cechą modyfikacji produkcji jest wprowadzenie symetrycznych, równomiernie rozłożonych przetłoczeń prowadzących do ujednorodnienia rozkładu naprężeń na przekroju kształtowanego profilu, a tym samym do zwiększenia stabilności wymiarowej profilu na jego długości, tj. ograniczenia występowania wady szablności profilu po jego cięciu na odcinki o wymiarze handlowym.

reklama



Poznaj rozwiązanie automatyzacyjne

Mach-Tool Poznań, 31.05-03.06.2022

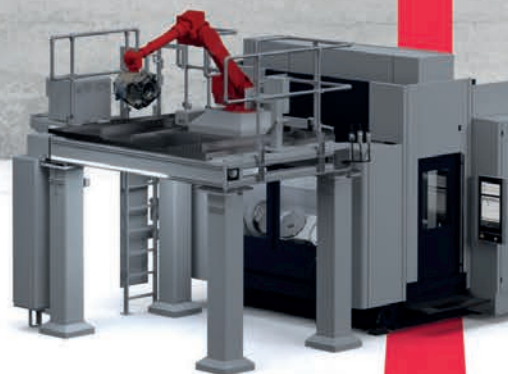
Pawilon 3, stoisko 19

TopRob jest dostosowany do różnych centrów obróbczych, umożliwia automatyczny załadunek i rozładunek maszyn, oszczędzając miejsce.

- Moduł z robotem stacjonarnym do pojedynczych maszyn lub z robotem mobilnym dla linii wielomaszynowych
- Systemy chwytaków ręcznych lub automatycznych
- Różne opcje rozbudowy
- Możliwy ciężar komponentów do 100 kg

Twoje zalety – Twoja przewaga –
Twój świat produkcji.

sw-machines.com.pl



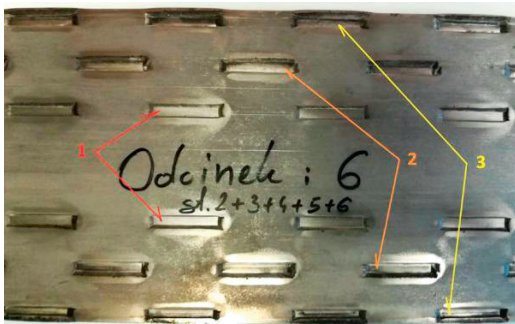
8. Przykładowa próbka pobrana do badań z linii technologicznej – zaznaczone linie pogłębienia 1, 2 i 3

9. Przykład przekroju profilu stosowanego w stolarce przeciwpożarowej

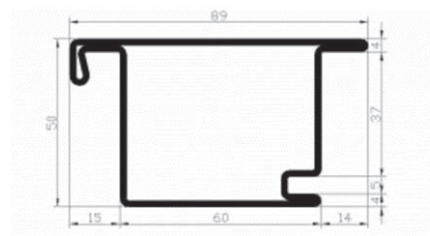
10. Koncepcja nagniatania wzdłużnego walcami o specjalnie zaprojektowanym profilu

11. Schemat modeli numerycznych procesu zaginania dla wstępnie pocienionej blachy (gięcie 180°)

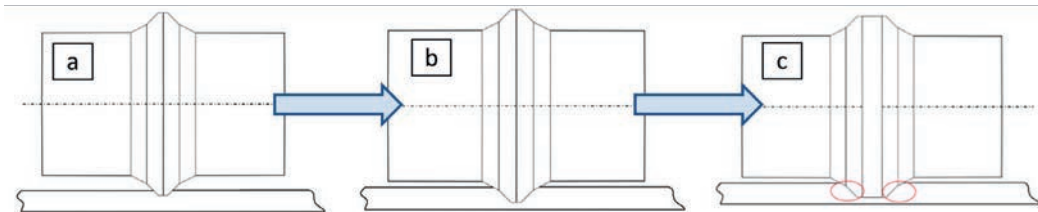
12a, b. Wyniki symulacji zagięcia 180° dla pocienionej i niepocienionej blachy; zarejestrowany poziom sprężynowania odpowiednio 0,38 mm (rys. 12a) i 0,13 mm (rys. 12b)



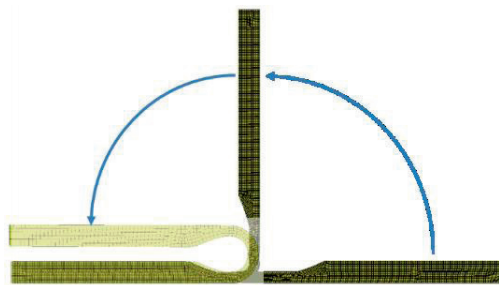
Rys. 8.



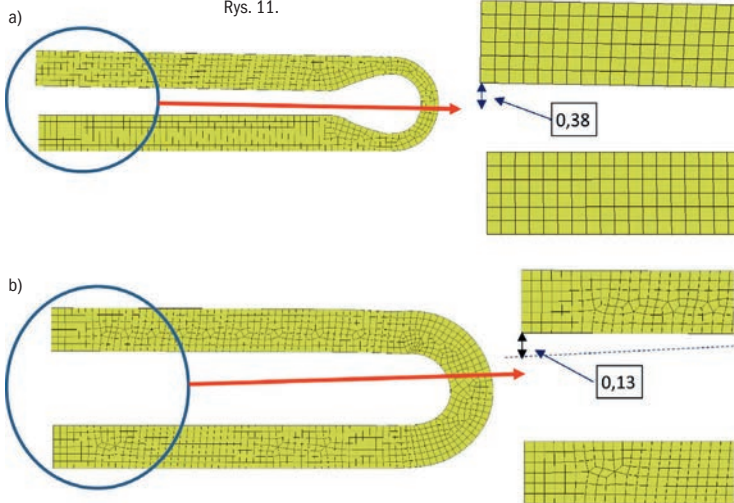
Rys. 9.



Rys. 10.



Rys. 11.



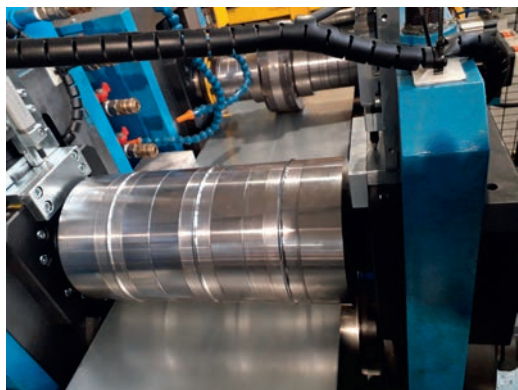
Rys. 12.

❖ **Walcowanie wgłębień wzdłużnych**

Profile stalowe stosowane w stolarce otworowej, w tym przeciwpożarowej, charakteryzują się złożonym przekrojem, rys. 9, który musi uwzględniać specjalne wymagania dotyczące mocowania konstrukcji w otworze. Proces gięcia ma jednak swoje ograniczenia. Jednym z nich jest wpływ grubości kształtowanej blachy na możliwość uzyskania założonego kąta wewnętrznego. Przy niewłaściwym dobraniu tych dwóch parametrów może

dojść do defektów kształtu zarówno w strefie włókien rozciąganych, jak i ściskanych, takich jak pofałdowanie lub pęknięcia materiału. Jest to szczególnie problem w przypadku zamkniętych profili, w których występują kąty gięcia równe lub zbliżone do 180°. Można temu zaradzić, stosując odpowiednie dociski, ale zamknięte narożniki są trudniejsze do kontrolowania, a co za tym idzie – mniej dokładne, ponieważ układ walców nie może dotykać obu stron materiału. Innym rozwiązaniem może być lokalne pocienienie blachy biegnące wzdłuż projektowanej linii gięcia. Nie jest to jednak rozwiązanie trywialne, ponieważ istnieje prawdopodobieństwo osłabienia konstrukcji poprzez pocienienie blachy w kilku strefach, które nie będzie skompensowane przez umocnienie materiału uzyskane na drodze plastycznego odkształcenia. To zagadnienie było m.in. obszarem przeprowadzonych badań, mających na celu sprawdzić również możliwość jednoczesnego wykorzystania efektu poszerzenia blachy dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu kształtu walców pocieniających blachę.

W trakcie procesu lokalnego pocieniania wstęgi narzędzie kształtujące (rolka) lokalnie uplastycznia materiał i wymusza przesunięcie części materiału w kierunku prostopadłym do osi wstęgi. Wielkość strefy odkształconej plastycznie jest zależna od geometrii narzędzia wykonującego lokalne pocienienie wstęgi oraz wielkości (wysokości) dosunięcia rolki do materiału, tak jak to pokazano na rys. 10a–b. W kolejnych etapach kształtowania pocienienia zwiększanie rozstępu pomiędzy powierzchniami kształtującymi rolki przez



Rys. 13.



Rys. 14.

wstawianie elementów dystansowych powoduje rozdzielenie strefy odkształcenia plastycznego na dwa obszary, rys. 10c. Wielkość pojedynczej strefy odkształcenia (w pierwszym etapie pocieniania) i dwóch stref w kolejnych etapach w porównaniu do ilości materiału wstęgi w analizowanych przekroju jest niewielka. Uzyskuje się dzięki temu poszerzenie taśmy oraz zwiększa elastyczność w uzyskiwaniu większych kątów zagięcia, niż byłoby to możliwe dla blachy o wyjściowej grubości.

Zachowanie własności użytkowych wyrobu zakłada, że pomimo zmiany grubości pasa

blachy zachowane zostaną własności wytrzymałościowe. Zatem lokalna zmiana grubości musi zostać zrekompensowana wzrostem wytrzymałości. Wzrost wytrzymałości wynikający z pocienienia jest następstwem wprowadzenia lokalnego odkształcenia plastycznego i umocnienia materiału w strefie kształtowania. W celach porównawczych wykonano serie symulacji procesu zaginania dla blach z lokalnym pocienieniem i bez pocienienia. Schemat modelowania procesu gięcia pokazano na rys. 11 dla pocienionej blachy. Sprawdzano charakter sprężynowania oraz wpływ pocienienia na jego wielkość. Wyni-

13. Widok sekcji pocienianej, umieszczonej przed sekcjami kształtującymi profil (materiały MFO)

14. Zestaw rolek kształtujących/walujących (materiały MFO)

reklama





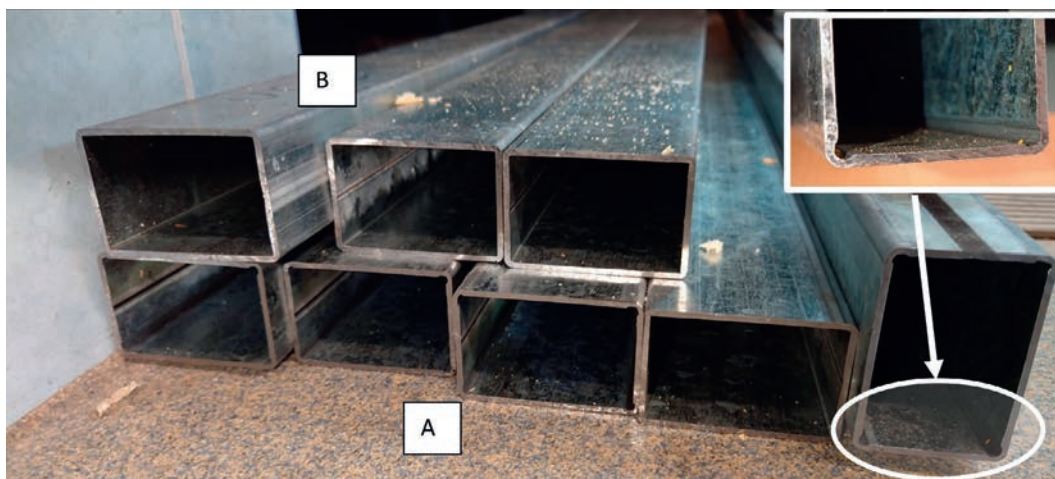


BWN10M i BCN10M: ostrzejsze niż się spodziewasz

- BWN10M i BCN10M: Najnowszej generacji gatunki do frezowania aluminium, stopów aluminium i metali nieżelaznych
- Bardzo łagodne frezowanie i wysoka odporność na zużycie
- BCN10M również idealnie nadaje się do obróbki wykańczającej stali, stali nierdzewnych i żeliwa

www.boehlerit.pl

15. Przygotowane do badań profile o grubości ścianki 1,5 mm i 2 mm: A – profile ze strefą pocienioną (strefy pocienione wskazane), B – profile standardowe (bez pocienienia ścianki) (materiały MFO)



Rys. 15.

❖ ki potwierdzają wcześniejsze badania, mówiące o tym, że jeśli gięcie jest lokalizowane w strefie pocienienia, wówczas obserwowany jest większy kąt powrotnego odkształcenia, co pokazano dla wybranych przykładów na rys. 12.

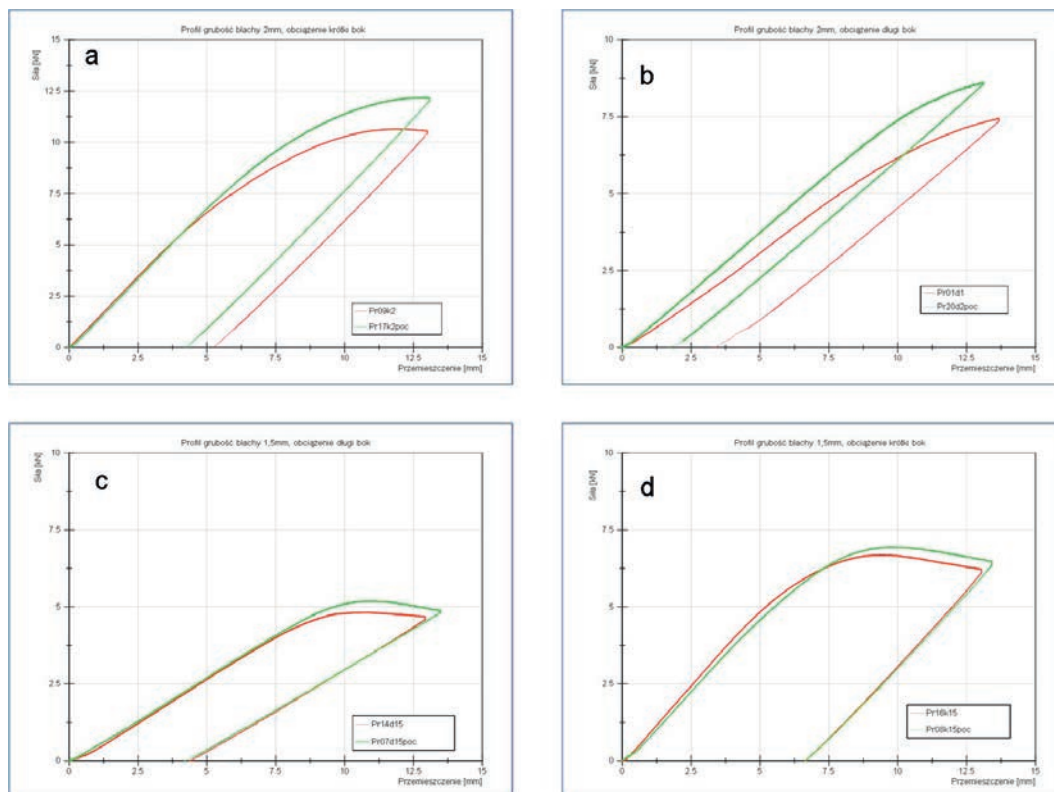
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że technologia lokalnego pocieniania wstęgi taśmy pozwala na uzyskanie lokalnie umocnionego materiału o podwyższonych własnościach mechanicznych, a stopień wzrostu własności jest zależny od wybranego gatunku stali. Ponadto wskazano, że charakter pocienienia wpływa na efekt sprężynowania w przypadku gięcia wzdłuż pocienionej strefy, ale jest kompensowany w przypadku wielokrotnego zaginania (profil o złożonym kształcie przekroju). Badania umożliwiły wykazanie ilościowego wpływu wielkości promienia na efekt sprężynowania. Po przeprowadzeniu serii badań mających na celu uzyskanie optymalnego kształtu części kształtującej/nagniatającej walców, zaprojektowano i zbudowano linię pilotażową wyposażoną w dodatkową, poceniającą taśmę sekcję. Zaprojektowana i zbudowana sekcja poceniająca taśmę, rys. 13, została wyposażona w sześć klatek uzbrojonych w specjalne walce, rys. 14, wymuszające narastająco poszerzenie strefy pocienionej do założonej wartości. W badaniach zastosowano zestaw poceniający, składający się z trzech kompletów rolek kształtujących montowanych w zespole (na jednym wałku, rys. 13). Proces pocienienia zrealizowano w sześciu następujących po sobie klatkach. Zestaw rolek zamontowanych w dalszych klatkach pozwolił na ukształtowanie profilu w taki sposób, że strefy pocienienia znalazły się w strefie gięcia. W strefie gięcia wykonano badania wpływu pocienienia

na możliwość powstawania mikropęknięć, natomiast w strefie centralnej na badanie własności materiału po kształtowaniu poceniającym.

Pilotażowa linia została wykorzystana do wykonania profili o nowej konstrukcji, ze strefowym pocienieniem ścianki, rys. 15, o wymiarach poprzecznego przekroju 40 x 60 mm. Uzyskano profile charakteryzujące się pocienionymi strefami, dedykowanymi dokładnemu gięciu, prowadzonemu w ramach tych stref. Uzyskano przy tym minimalną prędkość produkcyjną powyżej założonej, wynoszącej 15 m/min. Wykonany prototyp profilu został zbadany pod kątem sztywności. Statyczną próbę zginania przeprowadzono za pomocą urządzenia do 3-punktowego zginania z dwoma podporami (rozstaw 1000 mm). Obciążanie próbki prowadzono do momentu pojawienia się odkształceń trwałych na profilu. W trakcie próby rejestrowano siłę gięcia i przemieszczenie rolki górnego trzpienia. Na tej podstawie sporządzono wykresy zmiany siły w funkcji przemieszczenia, rys. 16. Każde badanie powtórzono trzykrotnie dla każdego profilu. Uzyskane wyniki wskazują, że w porównaniu do profilu standardowego (bez strefowego pocienienia) wykazuje porównywalną, nieznacznie podniesioną wytrzymałość przy zmniejszeniu wagi o ok. 7% w próbie standardowego gięcia.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące przygotowania założeń do uruchomienia nowych linii technologicznych, zmodyfikowanych o dodatkowe operacje nagniata blach w wybranych strefach wedle dwóch koncepcji. Zaproponowane modyfikacje technologii kształtowania profili stalowych na drodze lokalnego pocienienia



Rys. 16.

16. Zestawienie wykresów przebiegów siły gięcia w funkcji przemieszczenia dla wybranych wariantów profili. Wykresy przedstawiają przebiegi średnie dla trzech prób: krzywe zielone – profil z pocienioną ścianką, krzywe czerwone – profil standardowy (bez pocienienia)

wstęgi taśmy pozwalają na uzyskanie – w zależności od koncepcji – poszerzenia taśmy wejściowej, lokalnego pocienienia umożliwiającego gięcie w szerszym zakresie kątów oraz lokalnie umocnionego materiału o podwyższonych własnościach mechanicznych. Charakter pocienienia wpływa na efekt sprężynowania w przypadku gięcia wzdłuż pocienionej strefy, ale jest kompensowany w przypadku wielokrotnego zaginania (profil o złożonym kształcie przekroju). Kształt rolek walcujących/poceniających w obu koncepcjach wpływa na jakość walcowania/wgłębiania. Założony stopień pocienienia blachy – 0,5 grubości początkowej – nie wykazał podatności na niebezpieczeństwo pojawie-

nia się mikropęknięć wynikających z różnych stanów naprężeń we włóknach wewnętrznych i zewnętrznych materiału, charakterystycznych dla procesu gięcia. □

Badania towarzyszące wdrożeniu przedstawionych technologii zostały wykonane w ramach grantów NCBiR w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020: „Wdrożenie innowacyjnej zautomatyzowanej technologii wytwarzania profili z przetłoczeniem rozszerzającym o nowatorskiej konstrukcji” oraz „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania kształtownika cienkościennego o podwyższonych parametrach przeznaczonego dla stolarki otworowej, w tym przeciwpożarowej”.

Piśmiennictwo

- Halmos G.: *Roll Forming Handbook*. Taylor & Francis Group, 2006.
- Current Trends in Sheet Metal Forming, Proceedings of Conference on Sheet Metal Forming*. Delhi, 2020.
- Alexa V., Rațiu S., Kiss I.: *Metal rolling – asymmetrical rolling process*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2016, 106.
- Hirt G., Senge S.: *Selected processes and modeling techniques for rolled products*. „*Procedia Eng.*”, 2014, 13, t. 81, 18–27.
- Chaudhari H.S., Pimpale S.S.: *Application of flexible roll forming technique to manufacture variable cross-section profiles*. 2017, 1, 135–139.
- Jurkovic M., Jurkovic Z., Buljan S., Obad M.: *An experimental and modelling approach for improving utilization rate of the cold roll forming production line*. „*Adv. Prod. Eng. Manag.*”, 2018, 1, t. 13, 57–68.
- Traub T., Chen X., Groche P.: *Experimental and numerical investigation of the bending zone in roll forming*. „*Int. J. Mech. Sci.*”, 2017, 131–132, 956–970.
- Hui X., Wang X.: *Forming quality analysis on the cold roll forming C-channel steel*. „*Materials (Basel)*”, 2018, 11 (10), 1911.
- Gronostajski Z., Pater Z., Madej L., Gontarz A., Lisiecki L., Łukaszek-Sołek A., Łuk-sza J., Mróz S., Muskalski Z., Muzykiewicz W. et al.: *Recent development trends in metal forming*. „*Arch. Civ. Mech. Eng.*”, 2019, 3, 898–941.
- Kochański A., Czyżewski P., Cacko R., Roznowski M.: *Analysis of the innovative channel strut concept manufactured by roll-forming*. „*Materials (Basel)*”, 2022, 3, 1107.
- Roznowski M., Mirski T.: *Method for obtaining steel sections and the steel section*. PL225443, 2015.
- Dadgar Asl Y., Sheikhi M., Pourkamali Anaraki A., Panahizadeh R.V., Hosein-pour Gollo M.: *Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD*. „*Int. J. Adv. Manuf. Technol.*”, 2017, 5–8, 1481–1492.
- Park H.S., Anh T.V.: *Different methods in analyzing roll forming process of automotive component*. In DAAAM International Scientific Book 2010; DAAAM International Vienna, 2010.
- Fann K.-J.; Lin C.Y., Chen Y. J.: *Finite element analysis of rolling process to locally thin metal strips*. „*Mater. Sci. Forum*”, 2018, 920, 10–15.