

Krzysztof SZAROWICZ

## ANALIZA MODELI PŁYNIĘCIA PASMA POMIĘDZY STACJAMI PROFILUJĄCYMI

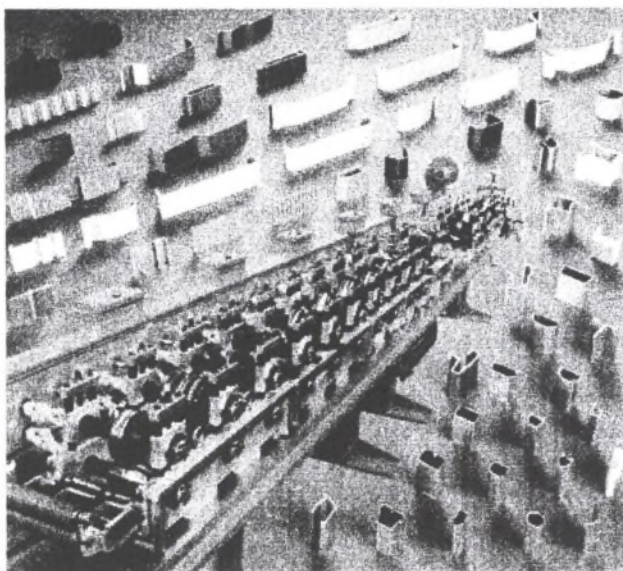
**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono obecnie wykorzystywane modele płynięcia pasma pomiędzy stacjami profilującymi. Dokonano oceny modeli oraz przedstawiono wyniki badań profilowanych pasm.

## ANALYSIS OF PLATE MODELS BETWEEN PROFILING STATION

**Summary.** The paper presents plate models between roll forming station. The paper shows also estimation of plate models and result of research roll formed plates.

### 1. WSTĘP

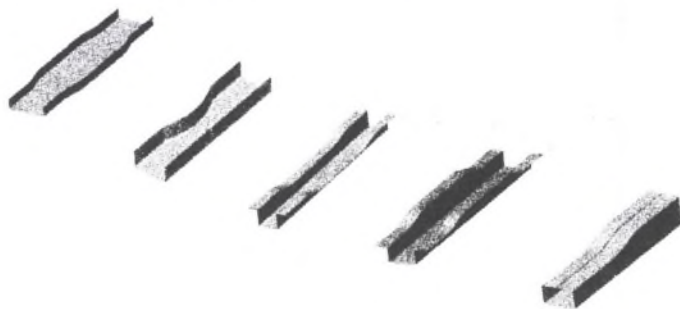
Proces profilowania na zimno pozwala na uzyskanie zarówno profili otwartych, jak i zamkniętych (rys. 1), niejednokrotnie o bardzo skomplikowanej geometrii. Materiałami wsadowymi do produkcji kształtowników mogą być: tworzywa sztuczne oraz stале zarówno o zwykłej, jak i podwyższonej wytrzymałości, stале nierdzewne oraz metale nieżelazne.



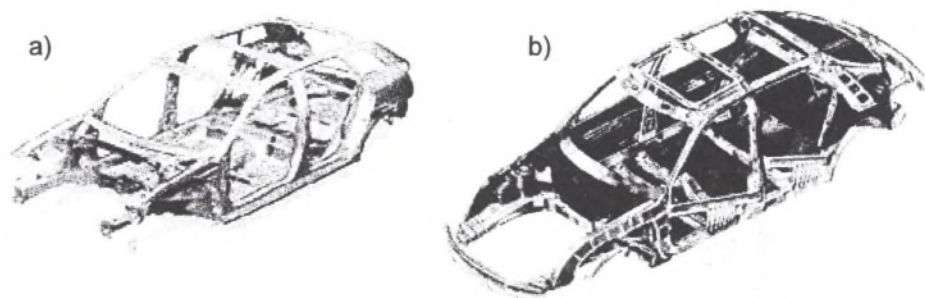
Rys. 1. Przykłady profili zimnogiętych [1]  
Fig. 1. Examples of cold roll forming shapes [1]

Tak szeroka gama materiałów pozwala na stosowanie coraz większego asortymentu profili zimnogiętych w budowie pojazdów, co znacznie wpłynęło na obniżenie ciężaru pojazdu, na jego eksploatację i poprawiło bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego.

Rozwój konstrukcji profilarek i ich sterowania pozwolił na opracowanie technologii profilowania kształtowników o zmiennym przekroju poprzecznym. Tego typu elementy stosowane są w budowie pojazdów jako części składowe nadwozi i podwozi samochodowych oraz jako elementy wzmacniające, czyli poprawiające bezpieczeństwo bierne. Przykłady wyrobów przedstawiono na rys. 2, a ich zastosowanie na rys. 3.



Rys. 2. Typoszereg kształtowników o zmiennej geometrii przekroju poprzecznego [2]  
Fig. 2. Cold roll forming shapes with variable shape-section [2]



Rys. 3. Zastosowanie kształtowników o zmiennym przekroju: a) Audi, b) Saab [3]  
Fig. 3. Cold roll forming shapes and their apply in cars: a)Audi, b) Saab [3]

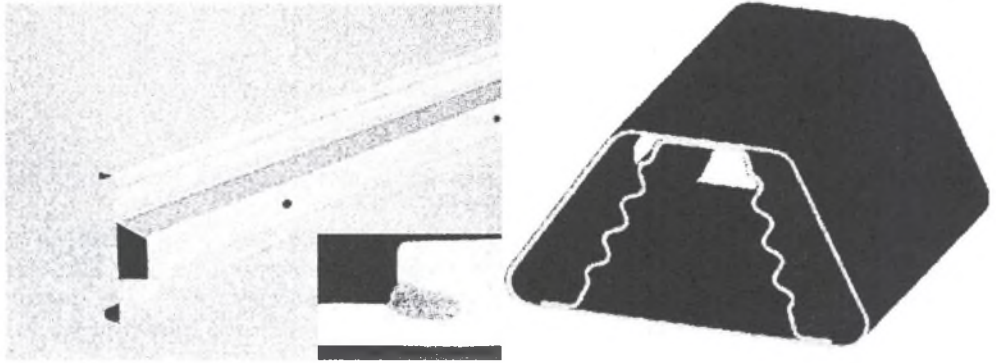
W budowie pojazdów w miejscach przenoszących duże obciążenia stosowane są coraz częściej profile składane z kilku pasm równocześnie profilowanych i składanych w jednej linii technologicznej (rys. 4). Profile te charakteryzują:

- duża wytrzymałość poprzeczna,
- możliwość absorpcji sił wzdłużnych.

Profile tego typu stosowane są na belki główne komory silnika jako element wzmacniający i konstrukcyjny. Ich dodatkowym atutem jest pochłanianie energii uderzenia czołowego, co znacznie poprawia bezpieczeństwo osób w pojeździe. Łączenia poszczególnych elementów ze względu na małe grubości pasm wykonuje się najczęściej metodą spawania laserowego.

W nowoczesnych technologiach utrudnione jest wytwarzanie wyrobów o powtarzalnych i optymalnych dla danego materiału i procesu własnościach bez wspomaganie komputerowego [4]. Obecnie projektowanie zarówno kształtu profilu, jak i technologii procesu odbywa się najczęściej w sposób intuicyjny, a co za tym idzie, czasochłonny. Poznanie i opis matematyczny zjawisk zachodzących podczas profilowania, takich jak: jednoczesne rozciąganie i gięcie materiału wsadowego [5], pocienienie w strefie gięcia i sprężynowanie

powrotne [6, 7], wymaga opracowania racjonalnych podstaw projektowania technologii. Zastosowanie wspomaganie komputerowego [8, 9, 10, 11] do procesu projektowania znacznie ułatwia opracowanie kompleksowych symulacji procesu, skracając tym samym czas wdrożenia do produkcji nowych kształtowników o skomplikowanych kształtach, jak również obniżając koszt ich wytwarzania. Istniejące programy komercyjne i będące ich podstawą modele płynięcia pasma spełniają warunki dla profili prostych. Skomplikowane profile, zwłaszcza o dużych promieniach gięcia, wymagają dogłębnej analizy głównie ze względu na duży kąt sprężynowania powrotnego profilowanego pasma, czego nie uwzględniają istniejące modele płynięcia pasma.



Rys. 4. Kształtowniki składane z dwóch wyprofilowanych pasm [12]  
Fig. 4. Cold roll forming shapes with two plates [12]

## 2. MODELE PŁYNIĘCIA PASMA

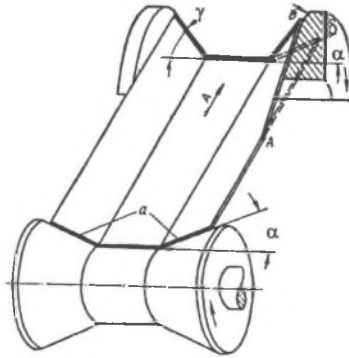
Prawidłowy opis matematyczny płynięcia pasma podczas profilowania powinien uwzględnić zarówno zmianę geometrii pasma pomiędzy kolejnymi stacjami profilarki (geometria pasma w stacji profilującej uwarunkowana jest kształtem rolek i szczeliną pomiędzy nimi), jak i rodzaj profilowanego materiału. W pracach [13, 14 – 17, 18, 19, 10, 20, 21 – 23] spotkać można różne podejścia do opisu płynięcia pasma pomiędzy stacjami profilującymi.

Dawydow i Maksakow w pracy [13] analizowali podgięcie ścianek bocznych „a” (rys. 5) o kąt  $\delta$ . Zmiana kąta  $\alpha$  przebiega w dwóch etapach:

- od stacji podginającej pasmo o kąt  $\alpha$  do punktu A – strefa pierwsza, w której na pasmo nie oddziałują stacje profilujące,
- wzdłuż odcinka AB (odcinek płynnego podgięcia) – strefa druga, w której występuje oddziaływanie kolejnej stacji profilującej.

Opis przedstawiony przez autorów publikacji [13] na odcinku pasma pomiędzy stacjami profilującymi wyróżnia dwie strefy. W pierwszej kąt  $\alpha$  ma wartość stałą, natomiast w drugiej rozpoczynającej się w punkcie A i kończącej w punkcie B (pionowa płaszczyzna symetrii rolki profilującej) pasmo gięte jest od kąta  $\alpha$  do kąta  $\gamma$ .

$$\gamma = \alpha + \delta$$



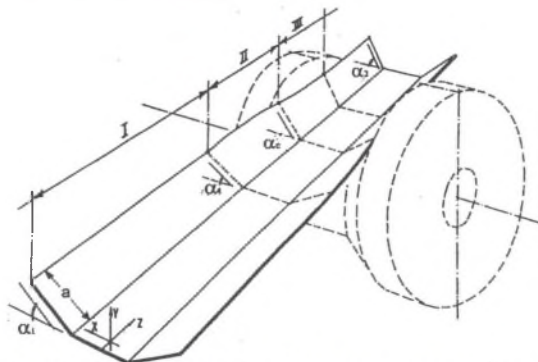
Rys. 5. Gięcie pasma na profilarce (górne rolki pominięto) [13]  
Fig. 5. Roll bending (upper rolls was deleted) [13]

W strefie tej pasmo kształtowane jest w sposób sprężysto – plastyczny, lecz autorzy nie definiują jednoznacznie długości poszczególnych stref.

Powyższy podział jest uproszczony i nie opisuje precyzyjnie zjawisk zachodzących w kształtowanym materiale. Do najpoważniejszych mankamentów należy brak uwzględnienia sprężynowania powrotnego pasma oraz założenie, że odcinek AB jest prosty. W rzeczywistości pasmo wchodzące do kolejnej pary rolek ma kształt łuku i częściowo przylega do rolki profilującej, co potwierdzają publikacje [24, 14, 15].

Nieco inne podejście do określenia stref pomiędzy stacjami profilującymi proponują Zhu, Pantan i Duncan w pracach [16, 17]. Przyjęto podział pasma na trzy strefy (rys. 6):

- strefa pierwsza (proces ustalony), w której pasmo nie styka się z rolkami i kąt podgięcia pasma  $\alpha_1$  nie ulega zmianie,
- strefa druga, w której sztywne strefy zewnętrzne pasma odkształcane są na skutek oddziaływania kolejnej stacji profilującej (odcinek płynnego podgięcia),
- strefa trzecia, w której kąt podgięcia zmienia się w funkcji geometrii rolek, następuje styk pasma z narzędziami profilującymi.



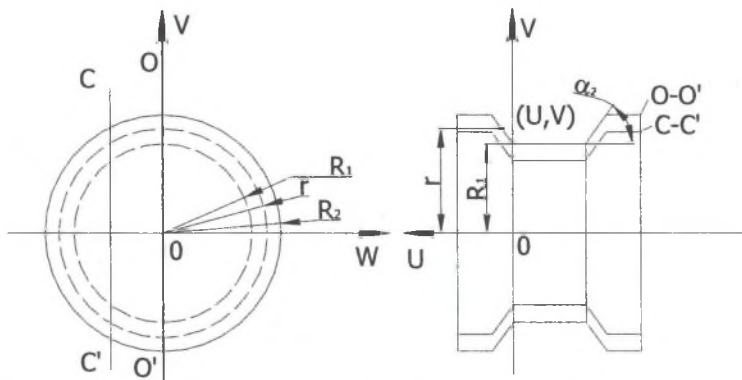
Rys. 6. Podział na strefy kształtowanego pasma [16]  
Fig. 6. Zones of the plate [16]

Autorzy wprowadzają następujące założenia:

- podstawa kształtownika pozostaje płaska i równoległa do osi Z przez cały czas profilowania,
- w strefie pierwszej krawędzie zewnętrzne pasma są równoległe,

- zachowana jest zasada stałości przekrojów,
- model nie uwzględnia sprężynowania powrotnego,
- wprowadzono dwa układy:  $u, v, w$  – związany z rolką profilującą oraz  $x, y, z$  – ogólny układ współrzędnych.

Układ współrzędnych „ $u$ ”, „ $v$ ”, „ $w$ ” przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Układ współrzędnych „ $u$ ”, „ $v$ ”, „ $w$ ” związany z rolką profilującą [17]

Fig. 7. Coordinate system „ $u$ ”, „ $v$ ”, „ $w$ ” related with roll [17]

Autorzy pracy [17] proponują następujący wzór na zmianę kąta podgięcia pasma w strefie drugiej:

$$\alpha(z) = \alpha_1 + \frac{3g}{8a^3} (L - z_1)^2$$

gdzie:

$\alpha$  – bieżący kąt gięcia pasma,

$\alpha_1$  – kąt gięcia stacji poprzedniej,

$z_1$  – odległość od poprzedniej stacji profilującej do początku odcinka płynnego podgięcia.

Odległość  $z_1$  obliczana jest z następującego wzoru [25]:

$$z_1 = L - \sqrt{\frac{8a^3 * (\alpha_{i+1} - \alpha_1)}{3g}}$$

Podział pasma na trzy strefy nie oddaje w pełni charakteru odkształceń pasma występujących podczas profilowania, gdyż podobnie jak w przypadku publikacji [13] nie uwzględnia istotnego efektu sprężynowania powrotnego pasma wychodzącego ze stacji profilującej. Model ten został rozbudowany o strefę trzecią, która obrazuje zachowanie się pasma wchodzącego do kolejnej stacji profilującej. Nie zachodzi tu punktowy styk pasma w osi symetrii, jak miało to miejsce w modelu Dawidowa i Maksakowa.

Przedstawione dwa modele zachowania się taśmy pomiędzy stacjami roboczymi dotyczyły kształtowników o stosunku  $\frac{R_w}{g} \leq 20$ . Kiuchi w publikacji [18] przedstawił model

płynięcia pasma pomiędzy kolejnymi parami rolek opracowany na podstawie profilowania rury z taśmy o grubości 4,5 mm. Na podstawie badań autor opracował następujące równanie:

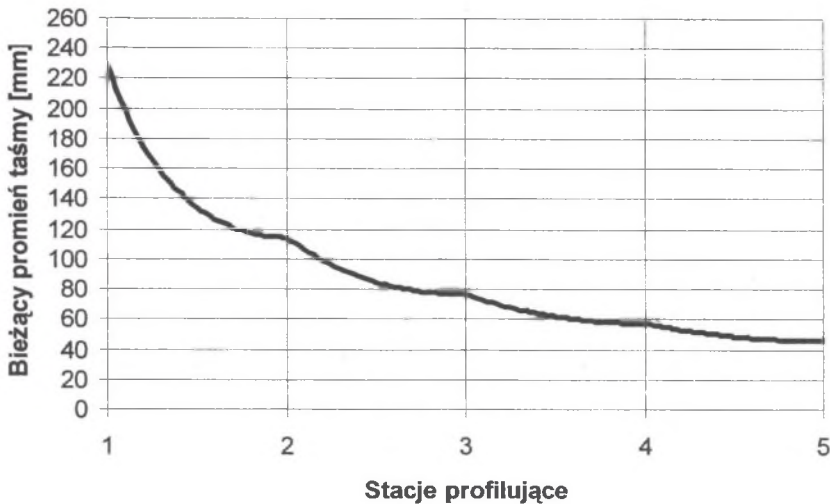
$$R = \left[ \frac{1}{R_{i-1}} + \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_{i-1}} \right) \sin \frac{\pi x}{2L} \right]^{-1} \quad (1)$$

$R$  – biezący promień taśmy pomiędzy stacją „ $i$ ” oraz „ $i-1$ ”,

$R_i$  – promień  $i$ -tej stacji profilującej,

$R_{i-1}$  – promień poprzedniej stacji profilującej,

$x$  – chwilowa odległość pomiędzy stacjami ( $0 \leq x \leq L$ ).



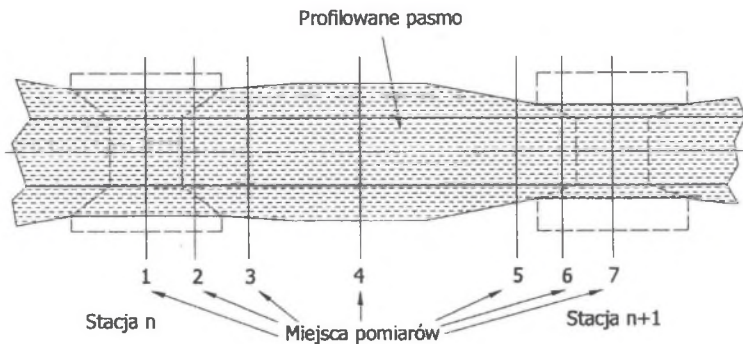
Rys. 8. Zmiana geometrii pasma w stacjach 1 – 5 [18]

Fig. 8. Change of plate geometry in station 1 – 5 [18]

Rys. 8 wykonany został w oparciu o równanie (1) i obrazuje, w jaki sposób zmienia się promień profilowanego pasma pomiędzy stacją pierwszą i piątą (promienie gięcia w stacjach są zadane). Według modelu założonego przez Kiuchi promień profilowania pasma jest stale malejący. Pominięty został efekt odprężenia pasma po wyjściu ze stacji profilującej. Model ten sprawdza się dla pasm wykonanych z materiałów o małej wartości granicy plastyczności (małe sprężynowanie) oraz grubościach powyżej 2 mm.

### 3. BADANIA

W celu sprawdzenia zachowania się pasma pomiędzy stacjami profilującymi przeprowadzono badania mające na celu pomiar szerokości pasma w siedmiu punktach (rys. 9). Pomiarzy wykonano z dokładnością 0,05 mm.



Rys. 9. Miejsca pomiarów profilowanego pasma

Fig. 9. The places of measurement of plate

W celu potwierdzenia pomiarów wykonanych w siedmiu punktach pomiarowych i zwiększenia dokładności przeprowadzanych pomiarów dokonano fotografii badanego profilu w każdej stacji profilującej. Zdjęcia wykonano z rozdzielczością 2560x1920 pikseli, co pozwoliło na zwiększenie liczby miejsc pomiarowych do 20. Przy odległości pomiędzy stacjami 250 mm dają pomiary co 12,5 mm. Odległość pomiędzy krawędziami zewnętrznymi pasma obliczana była na podstawie liczby odczytanych pikseli. Przeprowadzone obliczenia wykazały błąd wynikający z kulistości soczewki rzędu 0,2%.

Badania przeprowadzono na pasmach o początkowej szerokości 285,5 i 277,5 mm i grubości 0,6 mm. Skład chemiczny i własności mechaniczne materiału przedstawiono w tablicach 1 i 2.

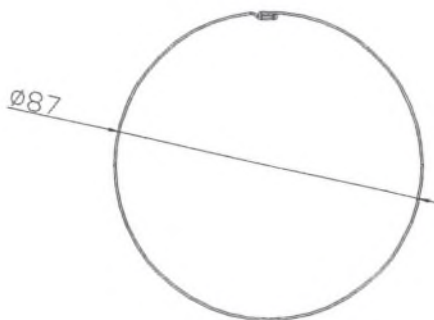
Tablica 1. Skład chemiczny badanego materiału

	C	Si	Mn	P	S	Al	B
Zawartość [%]	0,065	0,011	0,19	0,005	0,01	0,048	0,001

Tablica 2. Własności mechaniczne badanego materiału

$R_c$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]
208	328	34

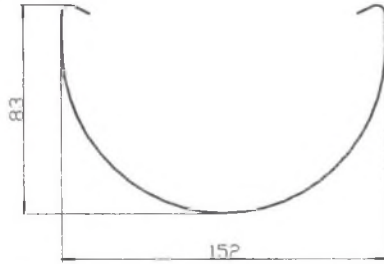
W wyniku profilowania pasma o szerokości 285,5 mm uzyskano kształt rury o średnicy 87 mm zamykanej wyprofilowanym zamkiem (rys. 10).



Rys. 10. Kształt profilu zamkniętego – rura

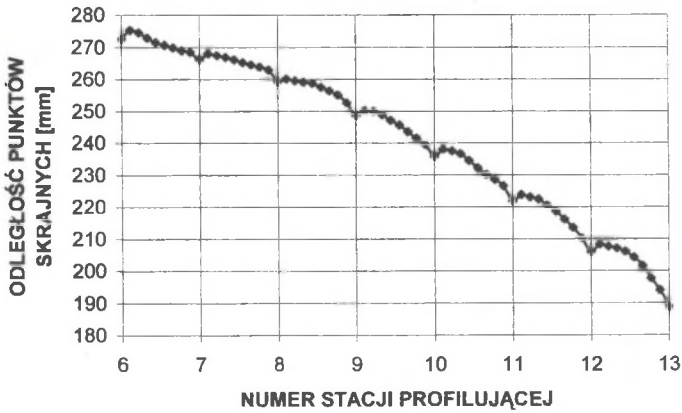
Fig. 10. The shape of close profile.

Pasma o szerokości 277,5 mm służyło do profilowania kształtownika otwartego (korytka) przedstawionego na rys. 11.

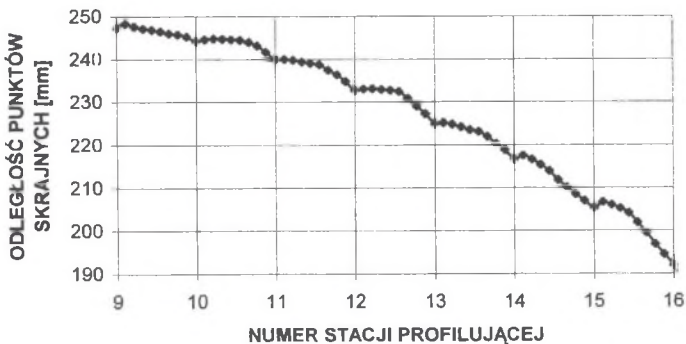


Rys. 11. Kształt profilowanego korytka  
Fig. 11. The shape of open profile

Na podstawie otrzymanych wyników badań sporządzono wykresy płynięcia pasma pomiędzy wybranymi stacjami profilarki (rys. 12 i 13).



Rys. 12. Wykres płynięcia pasma pomiędzy stacjami 6 – 13 (profil zamknięty)  
Fig. 12. Graph of plate shape in station 6 – 13 (close profile)



Rys. 13. Wykres płynięcia pasma pomiędzy stacjami 9 – 16 (profil korytkowy)  
Fig. 13. Graph of plate shape in station 9 – 16 (open profile)



Zarówno profil zamknięty, jak i korytkowy wykazywały podobne zachowania. Po wyjściu ze stacji następuje powiększenie odległości punktów skrajnych pasma, co świadczy o występowaniu sprężynowania powrotnego, następnie krótki ruch ustalony (brak oddziaływania stacji profilujących) i odcinek płynnego podgięcia wraz z wejściem pasma do kolejnej stacji profilującej.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej wynika, że brak jest modeli matematycznych, które uwzględniają istotne zjawisko, jakim jest sprężynowanie powrotne profilowanego pasma. Zjawisko to w sposób bezpośredni związane jest z charakterem odkształceń w paśmie, co z kolei wpływa na jakość geometryczną gotowego wyrobu. Z przeprowadzonych badań wynika, że zjawisko sprężynowania występuje podczas profilowania, w szczególności gdy profilowane są pasma o niewielkich grubościach z materiałów o podwyższonych własnościach mechanicznych. Materiały tego typu coraz częściej stosowane są na konstrukcje nadwozi samochodowych jako belki nośne lub pochłaniające energię uderzenia. Z uwagi na to duże znaczenie ma jakość geometryczna profili zimnogiętych, która związana jest z prawidłowo zaprojektowanym procesem profilowania, czyli z doбором odpowiedniego modelu płynięcia pasma.

#### LITERATURA

1. Materiały firmy Dreinstern 2002.
2. "Data M info-forum" sierpień 2004 (s. 10,11).
3. „Blech” czerwiec 2004 (s. 222).
4. Łukowski J., Stańczyk M., Szarowicz K.: Zastosowanie profili zimnogiętych w nowoczesnych konstrukcjach pojazdów, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Transport z. 43, Gliwice 2001.
5. Han Z., Liu C., Lu W., Ren L., Tong J.: Spline finite strip analysis of forming parameters in roll forming a channel section, *Journal of Materials Processing Technology* 159, 2005 (s. 383 – 388).
6. Chang S.H., Shin J.M., Heo Y.M., Seo D.G.: Springback characteristics of the tailor-welded strips in U-bending, *Journal of Materials Processing Technology* 130-131, 2002 (s. 14 – 19).
7. Fu M.H., Chan K.C., Lee W.B., Chan L.K.: Springback in the roller forming of integrated circuit leadframes, *Journal of Materials Processing Technology* 66, 1997 (s. 107 – 111).
8. Schmoeckel D., Sitzmann B., Stricker N.: Technologieprozessor walzprofilieren, *Rohre und Profile* 43, 4.1996 (s. 169 – 173).
9. [www.datam.de](http://www.datam.de)
10. Brunet M., Mguil S., Pol P.: Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code, *Journal of Materials Processing Technology* 80-81, 1998 (s. 213 – 219).
11. Heislitz F., Livatyali H., Ahmetoglu M.A., Altan T.: Simulating roll forming by computer, *The Fabricator*, April 1997 (s. 24 – 28).
12. Materiały firmy Zeman, 2004.
13. Dawydow W.I., Maksakow M.P.: Gięte kształtowniki cienkościenne wytwarzanie WNT Warszawa 1961.

14. Duggal N., Ahmetoglu M.A., Kinzel G.L., Altan T.: Computer aided simulation of cold roll forming – a computer program for simple section profiles, *Journal of Materials Processing Technology* 59, 1996 (s. 41 – 48).
15. Farzin M., Salmani Tehrani M., Shamedi E.: Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 125-126, 2002 (s. 626 – 632).
16. Zhu S.D., Panton S.M., Duncan J.L.: The effect of geometric variables in roll forming a channel section, Department of Mechanical Engineering, University of Auckland.
17. Panton S.M., Zhu S.D., Duncan J.L.: Geometric constraints on the forming path in roll forming channel sections, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 206, 1992 (s. 113 – 118).
18. Kiuchi M., Koudabashi T.: Automated design system of optima roll profiles for cold roll forming, *Proceedings of the Third International Conference on Rotary Metalworking Processes*, Kyoto, 1984 (s. 423 – 436).
19. Han Z., Liu C., Lu W., Ren L., Tong J.: Spline finite strip analysis of forming parameters in roll forming a channel section, *Journal of Materials Processing Technology* 159, 2005 (s. 383 – 388).
20. Brunet M., Mguil S., Pol P.: Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code, *Journal of Materials Processing Technology* 80-81, 1998 (s. 213 – 219).
21. Han Z., Liu C., Lu W., Ren L.: The effect of forming parameters in the roll – forming of a channel section with an outer edge, *Journal of Materials Processing Technology* 116, 2001 (s. 205 – 210).
22. Han Z.W., Ren L.Q., Liu C., Lu W.P.: Modelling of cold roll forming of steel strip, *Materials Science and Technology*, April 2001 (s. 415 – 418).
23. Liu C., Zhou Y., Lu W.: Numerical simulation of roll-forming by B-spline finite strip method, *Journal of Materials Processing Technology* 60 1996 (s. 215 – 218).
24. Duncan J.L., Zhu S.D, Panton S.M.: Longitudinal and shear strain development in cold roll forming, *Journal of Materials Processing Technology* 60, 1996 (s. 219 – 224).
25. Lindgren M.: Modelling and simulation of the roll forming process, Lulea University of Technology, 2005.

Recenzent: Dr hab. inż. Eugeniusz Hadasik, prof. nzw. w Pol. Śl.