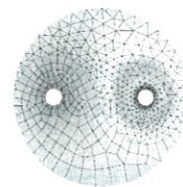




Wydawnictwo  
Naukowe  
AKAPIT



## WSPOMAGANA NUMERYCZNIE OPTIMALIZACJA PROCESU WYCISKANIA RUR I PRĘTÓW BIMETALOWYCH

PAWEŁ KAZANOWSKI, WOJCIECH Z. MISIOLEK, MARIO E. EPLER, VINOD K. SIKKA

### NUMERICALLY ENHANCED OPTIMIZATION OF BI-MATERIAL ROD AND TUBE EXTRUSION

#### Abstract

*The presented research results are an outcome of ongoing studies on optimization of the bi-material extrusion process. The initial billet geometry was optimized with a special focus on the ratio of the inner to the outer material thickness within the extrusion billet in order to control metal flow. The physical and numerical modeling techniques supported by a theoretical analysis have been implemented in the presented study. The viscoplasticity technique was used for physical modeling and the numerical modeling was performed with the Finite Element Method DEFORM™ package. Obtained experimental results confirmed the influence of the initial bi-material billet geometry on the geometrical stability of the extrudate cross-section. A complex interface microstructures between two aluminum alloys as well as between plain carbon steel and stainless steel extruded simultaneously have been observed using light optical microscopy. The proposed material and process modifications resulted in improved yield.*

### 1. WPROWADZENIE

Zapotrzebowanie współczesnego przemysłu na rury wykonane z dwóch lub więcej materiałów znacznie wzrosło w ostatnich latach. Jednocześnie rosną wymagania jakościowe stawiane gotowym wyrobom. Szczególny nacisk kładziony jest na stateczność przekroju poprzecznego, który w przypadku rur bimetalowych określany jest przez stosunek grubości zewnętrznego materiału rury do grubości materiału wewnętrznego. W przypadku prętów bimetalowych stateczność przekroju jest opisywana przez stosunek średnicy materiału zewnętrznego pręta do średnicy materiału wewnętrznego.

Aby utrzymać wspomniane stosunki grubości w założonych granicach, niezbędne jest określenie wpływu wyjściowej geometrii wlewka oraz warunków prowadzenia procesu wyciskania na jakość gotowego wyrobu. Optymalnie dobrana wyjściowa geometria wlewka pozwoli na zmniejszenie objętości odpadu a tym samym, na zwiększenie długości gotowego wyrobu o wymaganych parametrach wymiarowych.

Wiele czynników kontrolujących proces wyciskania prętów i rur bimetalowych zostało przedstawionych i dyskutowanych w literaturze. Większość autorów jest zgodna, że własności wytrzymałościowe bimetalowego produktu nie zależą tylko i wyłącznie

*P. Kazanowski, W.Z. Misiolek, M.E. Epler, Institute for Metal Forming, Lehigh University, 5 East Packer Avenue, Bethlehem, PA 18015, USA; V.K. Sikka, Oak Ridge National Laboratory, One Bethel Valley Road, Bldg. 4508, Oak Ridge, TN 37831, USA*





od własności materiałów użytych do jego produkcji ale są również funkcją parametrów geometryczno-technologicznych opisywanego procesu. Apperley i in. (2000) prowadzili badania eksperymentalne mające na celu optymalizację wytwarzania prętów bimateriałowych. Materiał wsadowy do badań przygotowano zamykając sproszkowany nadprzewodnik w miedzianym cylindrze. W oparciu o uzyskane wyniki autorzy podali optymalne warunki prowadzenia procesu. Niski współczynnik wydłużenia oraz mały kąt roboczy matrycy wraz z dużym polem przekroju materiału wewnętrznego w stosunku do materiału zewnętrznego zapewniają bardzo równomierne płynięcie materiału a zatem wysoką spójność gotowego wyrobu. Badania na temat pęknięcia bimateriałowych rur podczas wyciskania w wysokiej temperaturze były prowadzone przez Alcazara i in. (1996). Do analizy zagadnienia autorzy użyli metody górnej oceny wzbogaconej o specjalne kryterium energetyczne. Podobnie jak w poprzedniej pracy, kąt roboczy matrycy oraz współczynnik wydłużenia okazały się czynnikami mającymi dominujący wpływ na własności wytrzymałościowe produktu. Metoda badania podatności dwóch i więcej materiałów do jednoczesnego wyciskania wraz z analizą kształtu stref tworzących się w wyciskanym wlewku została podana przez Śliwę (1991, 1997). Rezultaty doświadczeń dowodzą jednoznacznie, że współczynnik wydłużenia jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na podatność materiałów do jednoczesnego wyciskania. Dodatkowo stwierdzono, że spójność wyrobu bimateriałowego nie zależy od wzajemnego stosunku granicy plastyczności dla użytych materiałów. Avitzur (1983) w swoich obliczeniach ujął prawie wszystkie czynniki opisujące proces wyciskania oraz ciągnięcia rur i prętów bimetalowych. Wyniki obliczeń w pełni potwierdzają dane doświadczalne opisane przez innych autorów.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki dotyczą analizy teoretycznej zależności między wyjściową geometrią wlewka a parametrami gotowego wyrobu. Bazując na badaniach własnych dotyczących analizy wyciskania pełnych wyrobów bimetalowych (Bandar i in. 2000) oraz modelowania wyciskania rur na trzpieniu (Kazanowski i Misiólek 2002a, Kazanowski i in. 2003a, 2003b) możliwe było zdefiniowanie podstawowych parametrów technologicznych w celu dalszej ich optymalizacji. Główny nacisk położono na zapewnienie maksymalnego uzysku przez odpowiedni dobór grubości zewnętrznego i wewnętrznego materiału wlewka. Przeprowadzono również analizę wpływu długości początkowej materiału wewnętrznego wlewka na wielkość odpadu. Na podstawie badań modelowych zaproponowano oryginalny kształt wlewka zapewniający minimalny odpad. Prezentację wyników ujęto w dwóch sekcjach przedstawiając najpierw wy-

niki dla prętów a potem dla rur. Pierwsza sekcja dotyczy optymalizacji procesu wyciskania rur bimetalowych na gorąco. W drugiej sekcji zebrano informacje na temat optymalizacji procesu wyciskania prętów bimetalowych. W końcowej części przedstawiono podsumowanie ujmujące wspólne wnioski dotyczące zarówno wyciskania rur i prętów bimetalowych.

## 2. PROCES WYCISKANIA RUR BIMETALOWYCH

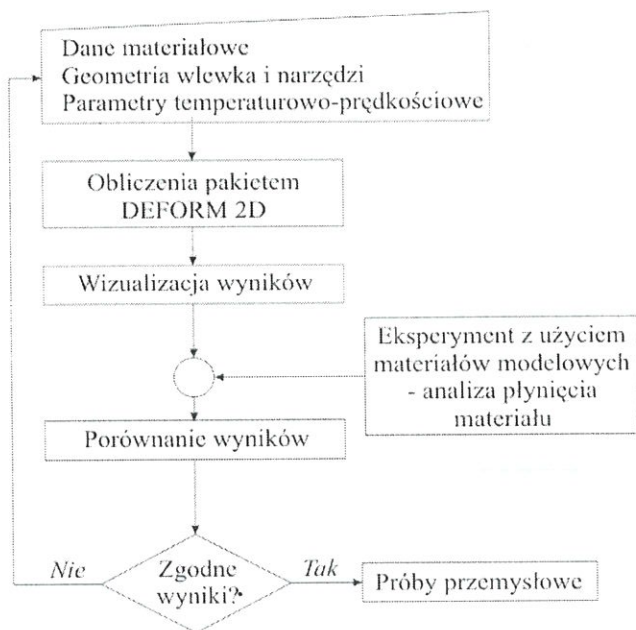
### 2.1. Optymalizacja wyjściowej geometrii wlewka

Wyjściowa geometria wlewka ma znaczny wpływ na płynięcie metalu jak również na parametry temperaturowo-prędkościowe procesu wyciskania. Przyjmując założenie, że rzeczywisty nacisk potrzebny do wyciśnięcia wlewka z pojemnika zależy głównie od oporu odkształcenia plastycznego materiału w danej temperaturze oraz od wielkości siły tarcia, która jest proporcjonalna do powierzchni kontaktu między wlewkiem a ściankami pojemnika i matrycy można stwierdzić, że maksymalny nacisk jednostkowy można „regulować” zarówno długością początkową wlewka jak i wielkością oporu plastycznego, który z kolei zależy od temperatury. Maksymalna długość początkowa wlewka przy wybranej temperaturze jest limitowana maksymalną nośnością prasy. W przypadku wyciskania rur na trzpieniu dochodzi dodatkowy czynnik w postaci tarcia materiału o powierzchnię trzpienia powodujący zwiększenie sił tarcia, a zatem zmniejszenie maksymalnej długości początkowej wlewka możliwego do wyciśnięcia na danej prasie. W przypadku wyciskania rur bimetalowych należy uwzględnić jeszcze jeden czynnik, jakim jest tarcie na powierzchni kontaktu wyciskanych materiałów wlewka. W trakcie analizy, której wyniki zaprezentowano poniżej, wybrano materiały, które w temperaturze wyciskania mają zbliżone wartości oporu plastycznego oraz założono, że tarcie na powierzchni kontaktu wyciskanych materiałów jest tak duże, że obydwa materiały odkształcają się równocześnie. Pełna analiza stateczności przekroju poprzecznego rur bimetalowych w procesie wyciskania na trzpieniu została przeprowadzona w oparciu o schemat przedstawiony na rysunku 1.

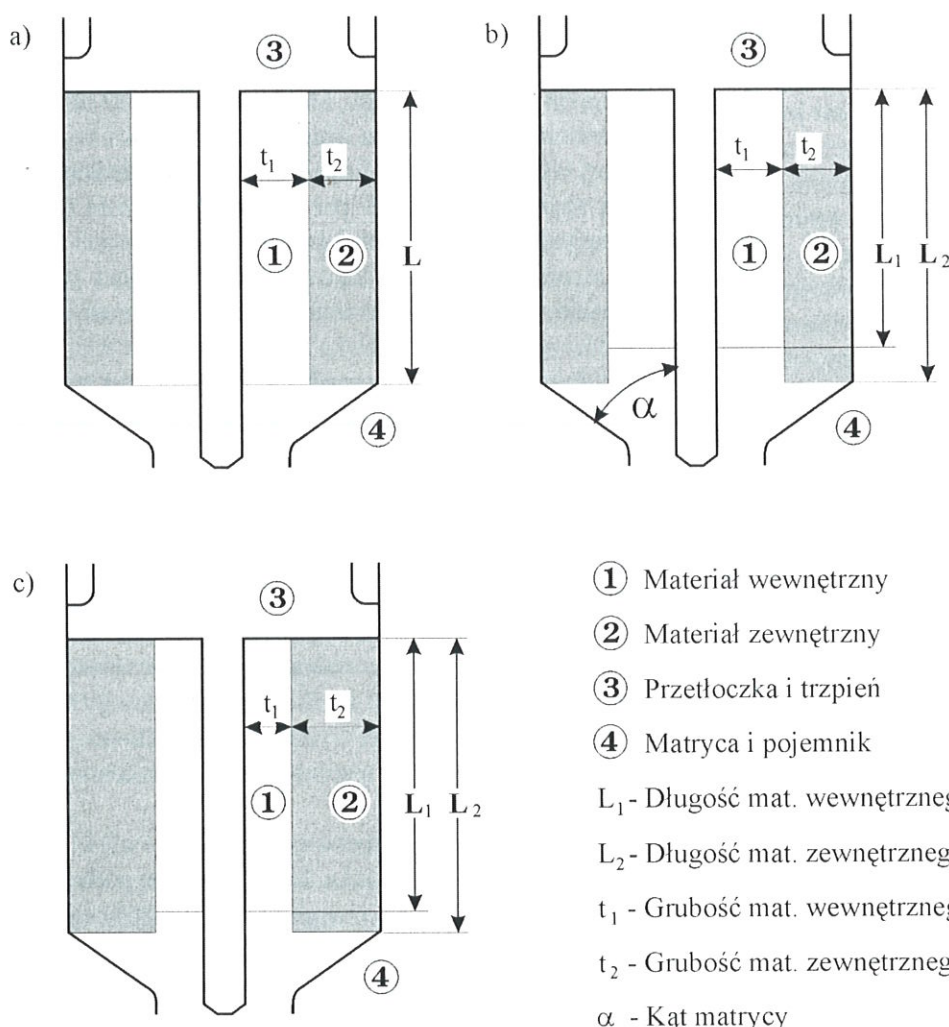
Najprostsza do zastosowania geometria wlewka jest przedstawiona na rysunku 2a. W tym przypadku długość materiału zewnętrznego oraz wewnętrznego jest jednakowa. Również grubości materiałów tworzących wlewki są jednakowe ( $t_1 = t_2$ ). Rozwiązanie takie jest najprostsze jednak pociąga za sobą spore straty wyrobu. Badania prowadzone nad wyciskaniem wyrobów pełnych z wlewków bimetalowych (Bandar i in. 2000)







Rysunek 1. Schemat optymalizacji geometrii wlewka w oparciu o wyniki obliczeń numerycznych oraz danych z modelowania metodą wizjoplastyczności.



- ① Materiał wewnętrzny
- ② Materiał zewnętrzny
- ③ Przetłocznka i trzpień
- ④ Matryca i pojemnik

$L_1$  - Długość mat. wewnętrznego

$L_2$  - Długość mat. zewnętrznego

$t_1$  - Grubość mat. wewnętrznego

$t_2$  - Grubość mat. zewnętrznego

$\alpha$  - Kąt matrycy

pokazują jednoznacznie, że jednakowa długość wewnętrznego i zewnętrznego materiału wlewka powoduje straty rzędu 20–25% objętości prasówki. Aby zapobiec temu zjawisku zaproponowano skrócenie materiału stanowiącego rdzeń wlewka.

Ten sam zabieg w odniesieniu do wlewka przeznaczonego do wyciskania rur na trzpieniu został przedstawiony na rysunku 2b ( $L_1 < L_2$ ). Długość o jaką należy skrócić rdzeń wlewka zależy od wielu czynników i parametrów procesu a długość wyliczona tylko na podstawie danych wyjściowych opisujących proces musi być zweryfikowana doświadczalnie. Kolejnym rozpatrywanym zagadnieniem był stosunek grubości materiału zewnętrznego do grubości materiału wewnętrznego w gotowym wyrobie. Zakładając, że celem jest mniejsza grubość materiału stanowiącego wewnętrzną część rury ( $t_1 < t_2$ ) można zaproponować geometrię wlewka przedstawioną na rysunku 2c. Dla przykładu, współcześnie produkowane rury bimetalewe dla przemysłu chemicznego posiadają warstwę wewnętrzną wykonaną z droższej stali kwasoodpornej i warstwę zewnętrzną z typowej stali konstrukcyjnej (Kazanowski i

Misiólek, 2002b). Stosunek grubości materiału wewnętrznego  $t_1$  do grubości materiału zewnętrznego  $t_2$  można wyznaczyć z dużą dokładnością korzystając z obliczeń pakietem opartym o metodę elementów skończonych. Jakość wyciskania mierzona ilością odpadu gotowego wyrobu, zależy od rodzaju użytej matrycy i geometrii wlewka.

## 2.2. Analiza teoretyczna procesu wyciskania rur bimetalewych

Punktem wyjściowym przedstawionej poniżej analizy teoretycznej procesu wyciskania rur bimetalewych na trzpieniu jest fakt, że naprężenie wywierane na obydwa materiały wlewka znajdujące się w pojemniku jest jednakowe. W miarę rozwoju technologii wyciskania metali szczegó-

Rysunek 2. Schemat ewolucji optymalnej geometrii wlewka gwarantującego maksymalny uzysk.

lowe badania prowadzone w latach trzydziestych poprzedniego stulecia (Siebel i Frangemeier 1931, Sasch i Eisbein 1931, Pearson i Smythe 1931) doprowadziły do sformułowania następującego równania wiążącego naprężenie wyciskania  $p$  ze współczynnikiem wydłużenia  $R$  poprzez stałą materiałowo-procesową nazywaną stałą wyciskania  $K$ :

$$p = K \ln(R) \quad (1)$$

Współczynnik wydłużenia  $R$  opisujący stopień redukcji przekroju wyjściowego wlewka jest definiowany jako stosunek pola przekroju poprzecznego pojemnika  $F_0$  do pola przekroju wyciskanego wyrobu  $F_1$ :

$$R = \frac{F_0}{F_1} \quad (2)$$

Stała wyciskania  $K$  wiąże w sobie parametry temperaturowo-prędkościowe procesu wyciskania wyznaczone dla konkretnej prasy i matrycy. Przykłady stałych wyciskania dla różnych materiałów wyznaczone przez Roberta i Fergusona (1991) dla szerokiego zakresu temperatur przedstawiono na rysunku 3.

Jak wspomniano we wstępie, jednakowe naprężenie przyłożone do obu materiałów wyciskanych równocześnie z jednego pojemnika pozwala na zapisanie

następującej równości:

$$p_{zew} = p_{wew} \quad (3)$$

gdzie:

$p_{zew}$  – naprężenie wyciskania materiału zewnętrznego wlewka,

$p_{wew}$  – naprężenie wyciskania materiału wewnętrznego wlewka.

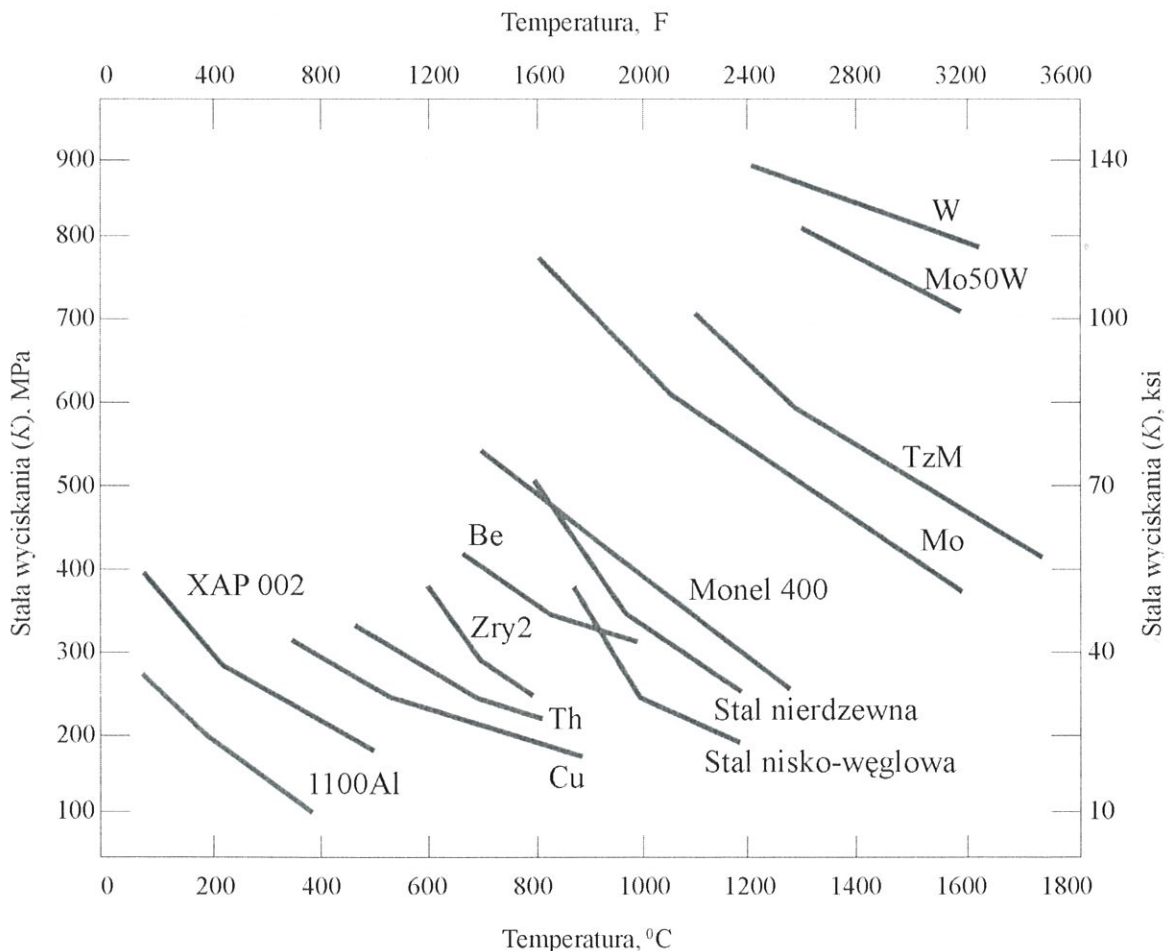
Biorąc pod uwagę równania (1), (2) można rozwiązać równanie (3) do następującej postaci:

$$K_{zew} \ln\left(\frac{F_{zew}^0}{F_{zew}^1}\right) = K_{wew} \ln\left(\frac{F_{wew}^0}{F_{wew}^1}\right) \quad (4)$$

Na rysunku 4 przedstawiono ustalony stan wyciskania rury bimetalowej na trzpieniu wraz z oznaczeniami.

W przypadku wyciskania rur na trzpieniu współczynnik wyciskania  $R$  jest definiowany w następujący sposób:

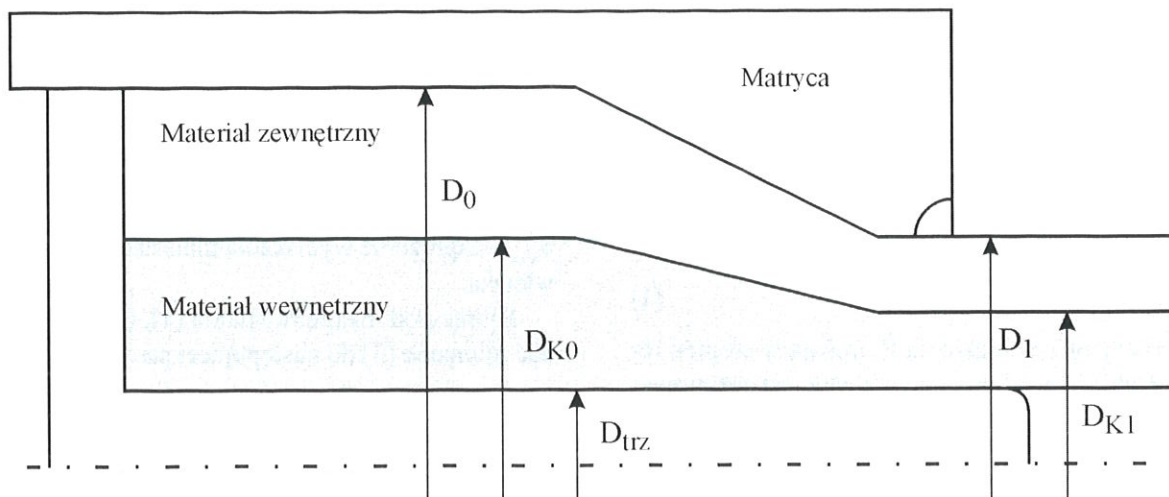
$$R = \frac{F_0}{F_1} = \frac{\frac{\pi}{4}(D_0^2 - D_{tr}^2)}{\frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_{tr}^2)} = \frac{D_0^2 - D_{tr}^2}{D_1^2 - D_{tr}^2} \quad (5)$$



Rysunek 3. Stałe wyciskania  $K$  wyznaczone dla różnych materiałów (Roberts i Ferguson 1991).







Rysunek 4. Schemat ustalonego płynięcia metalu podczas wyciskaniu rury bimaterialowej.

gdzie:

$D_0$  – średnica pojemnika,

$D_1$  – średnica otworu matrycy,

$D_{trz}$  – średnica trzpienia.

Podstawiając równanie (5) do równania (4) otrzymujemy związek opisujący równowagę naprężeń wyciskania panującą w bimetalowym wlewku w trakcie wyciskania:

$$K_{zew} \ln \left( \frac{D_{K0}^2 - D_{trz}^2}{D_{K1}^2 - D_{trz}^2} \right) = K_{wew} \ln \left( \frac{D_0^2 - D_{K0}^2}{D_1^2 - D_{K1}^2} \right) \quad (6)$$

gdzie:

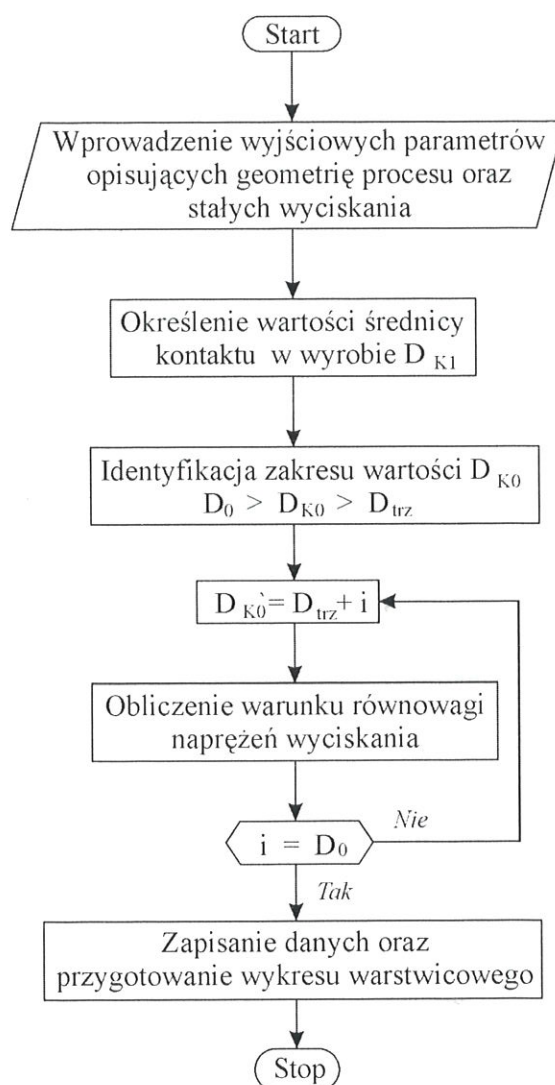
$D_{K0}$  – średnica obszaru kontaktu między materiałem zewnętrznym a wewnętrznym wlewka,

$D_{K1}$  – średnica obszaru kontaktu między materiałem zewnętrznym a wewnętrznym produktem.

W równaniu (6) występują dwie niewiadome  $D_{K1}$  oraz  $D_{K0}$  odpowiadające średnicom obszaru kontaktu między zewnętrznym a wewnętrznym materiałem wlewka w gotowym wyrobie oraz we wlewku. Przyjmując jedną z tych niewiadomych za stałą, w naszym przypadku  $D_{K1}$ , można wyznaczyć drugą niewiadomą  $D_{K0}$ . W oparciu o wyprowadzone równanie równowagi naprężeń wyciskania dokonano serii obliczeń, których schemat blokowy jest przedstawiony na rysunku 5.

Obliczeń dokonano w programie Mathcad 2000 (Wieder 1999). Jest to aplikacja pracująca w środowisku MS Windows łącząca w sobie graficzny interfejs użytkownika z bardzo szybkim i wydajnym procesorem obliczeniowym Maple. Dane wejściowe oraz formuły obliczeniowe wprowadza się do programu w standardowej notacji matematycznej. Dzięki temu zapis jest przejrzysty i umożliwia szybkie wprowadzanie zmian i poprawek. Wyniki obliczeń są prezentowane na bieżąco gdyż nie ma procesu kompilacji kolejnych kroków obliczeniowych.

Wyniki obliczeń dokonanych według przygoto-



Rysunek 5. Schemat obliczeń optymalnej geometrii wlewka w oparciu o wyprowadzone równanie równowagi naprężeń wyciskania.

wanego schematu zapisywano na bieżąco w pliku ASCII. Dla każdej wartości  $D_{K1}$  z przedziału określonego równaniem (7) otrzymano wartość określającą średnicę obszaru kontaktu w pojemniku między mate-

riałem zewnętrznym a wewnętrznym  $D_{k0}$  przy założonym stosunku stałych materiałowych  $K$ .

$$D_{k1} \in \langle D_{trz}; D_0 \rangle \quad (7)$$

Wyniki przedstawiono na wykresach warstwicznych. Do ich wykonania użyto programu Surfer 6.3. Jest to program działający w środowisku MS Windows mający przejrzysty interfejs użytkownika i bardzo dużą liczbę dostępnych typów wykresów.

Aby utworzyć wykres należy wczytać dane z pliku typu ASCII. Przykład wykresu warstwicowego utworzonego na podstawie danych obliczeniowych przedstawiono na rysunku 6. W obliczeniach przyjęto jednakową grubość materiału wewnętrznego i zewnętrznego w gotowym wyrobie dla współczynnika wydłużenia równego 8,73.

### 2.3. Modelowanie numeryczne – metoda elementów skończonych

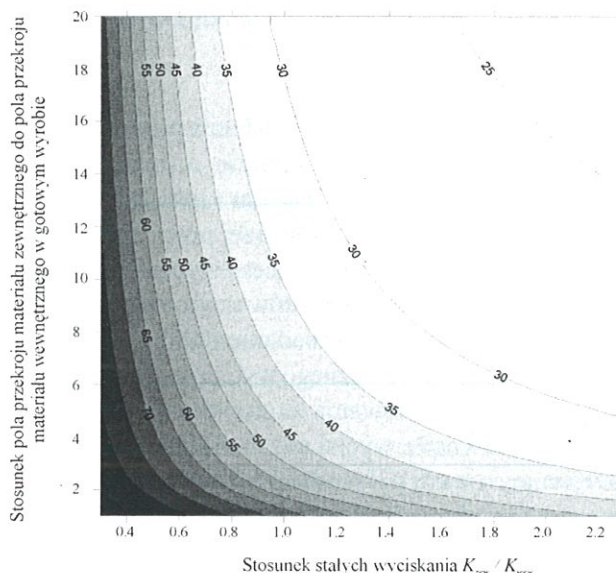
Uzupełnieniem analitycznego i doświadczalnego modelowania stateczności przekroju poprzecznego rur bimetalowych wyciskanych na trzpieniu są wyniki obliczeń dokonanych pakietem programów opartych na metodzie elementów skończonych DEFORM<sup>TM</sup>2D (Oh i in. 1991, Kazanowski i Libura 1999). Niewątpliwą zaletą programów do modelowania procesów przeróbki plastycznej opartych na metodzie elementów skończonych jest ich elastyczność oraz szybkość otrzymywania wyników. W połączeniu z olbrzymimi możliwościami wizualizacji wyników oraz stale rosnącą mocą obliczeniową współczesnych komputerów sta-

Tablica 1. Wartości oporu odkształcenia w różnych temperaturach i przy różnej wartości prędkości odkształcenia dla stali węglowej typu AISI 1020 (Prasad i Sasidhara 1997).

Odkształcenie	Prędkość odkształcenia, [s <sup>-1</sup> ]	Temperatura, [°C]			
		900	1000	1100	1200
1,0	0,0078	75,0	42,3	30,8	15,4
	0,1280	107,7	71,1	46,1	30,8
	1,021	137,5	100	75,0	46,1
	5,1200	153,8	120	80,4	57,7

Tablica 2. Wartości oporu odkształcenia w różnych temperaturach i przy różnej wartości prędkości odkształcenia dla stali nierdzewnej typu AISI 304 (Prasad i Sasidhara 1997).

Odkształcenie	Prędkość odkształcenia, [s <sup>-1</sup> ]	Temperatura, [°C]					
		800	900	1000	1100	1200	1250
0,5	0,001	216,2	123,9	58,1	36,4	21,6	18,3
	0,010	288,5	172,6	104,6	54,4	31,2	28,0
	0,100	330,3	230,5	153,0	93,5	54,0	37,3
	1,000	370,9	285,5	205,5	132,8	87,3	62,2
	10,000	388,9	332,4	251,0	192,8	126,5	89,8



Rysunek 6. Izoliny obliczonej wartości średnicy kontaktu między materiałem zewnętrznym a wewnętrznym wlewka  $D_{k0}$  [mm].

nowią one bardzo wygodne i pomocne narzędzie.

Modelowanie numeryczne przeprowadzono w oparciu o takie same parametry procesu jak w przypadku badań doświadczalnych. Jako materiał zewnętrzny przyjęto stal niskowęglową AISI 1020, jako materiał wewnętrzny stal nierdzewną AISI 304. Wartości oporu odkształcenia w różnych temperaturach i przy różnej wartości prędkości odkształcenia dla wspomnianych stali zawarto w Tabelach 1 oraz 2 (Prasad i Sasidhara 1997). Wartości te wraz z parametrami geometrycznymi wprowadzono do programu przed przystąpieniem do obliczeń. Przyjęto również założenie, że temperatura wyciskania wynosi 1200°C oraz dodatkowo, że proces jest prowadzony w warunkach adiabatacyjnych. Wyniki obliczeń zapisano do pliku i przeanalizowano korzystając z możliwości wizualizacji dostępnych w pakiecie DEFORM<sup>TM</sup>2D.

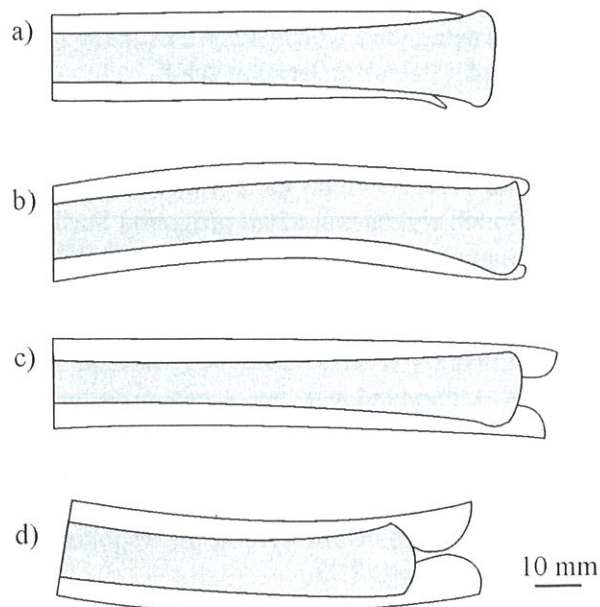


### 3. PROCES WYCISKANIA PRĘTÓW BIMETALOWYCH

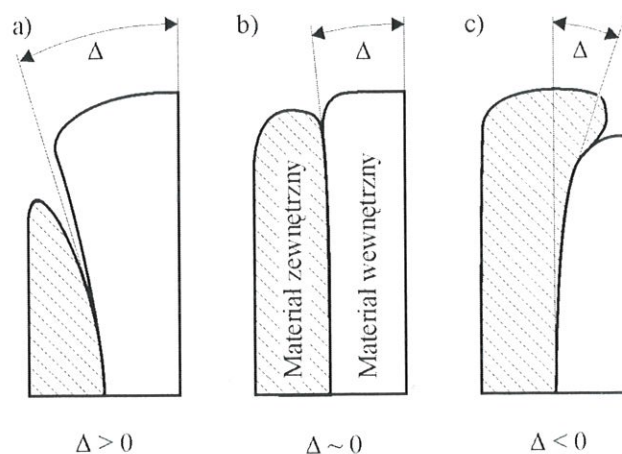
Optymalizację procesu wyciskania prętów bimetalowych poprowadzono w oparciu o prezentowane wcześniej badania własne (Bandar i inni, 2000, Kazanowski i inni, 2003b). W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki modelowania procesu wyciskania prętów bimetalowych metodą elementów skończonych. Szczególny nacisk położono na zbadanie stabilności geometrycznej przekroju wzdłużnego wyciskanego pręta oraz, przy pomocy modelowania numerycznego, na rozwój naprężeń wewnątrz wyciskanych materiałów. Zbadano również rozwój pól prędkości towarzyszących jednoczesnemu płynięciu dwóch metali.

W Tabeli 3 zestawiono podstawowe parametry procesu wyciskania prętów bimetalowych. Parametry te są jednakowe zarówno dla doświadczeń z użyciem materiałów metalicznych jak i dla przeprowadzonych obliczeń. Jako materiałów metalicznych użyto stopów aluminium: AA6063 materiał zewnętrzny, oraz AA2014 materiał wewnętrzny. Stabilność geometryczną wyrobu badano mierząc grubość materiału zewnętrznego i wewnętrznego wyciskanego pręta.

Bardzo interesująca jest analiza kształtu przekroju przedniej części wyciśniętych prętów bimetalowych jak zaprezentowano na rysunku 7. Analiza ilościowa tak zaprezentowanych wyników jest bardzo trudna. Aby rozwiązać ten problem zaproponowano nową metodę, której wyniki mogą posłużyć również jako wyznacznik spójności gotowego wyrobu. Opisywana metoda polega na pomiarze kąta  $\Delta$  zawartego między osią wyrobu a normalną do kontaktu między wyciśniętymi materiałami zgodnie z rysunkiem 8. Wyniki pomiarów dokonanych na rzeczywistych prętach bimetalowych przedstawiono na rysunku 9. Umownie przyjęto, że dodatnie wartości kąta  $\Delta$  opisują pręt o wyższej spójności mię-



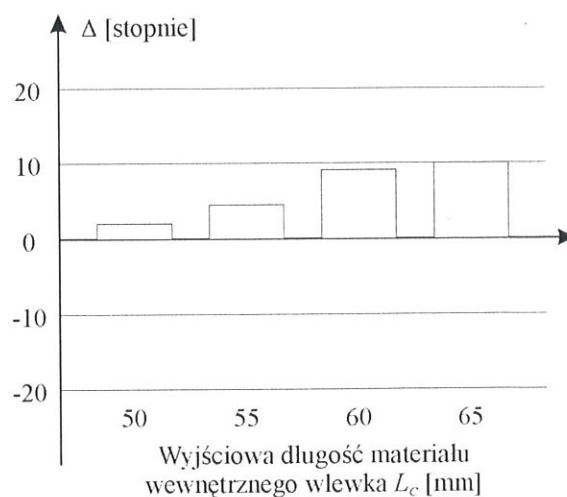
Rysunek 7. Przekrój poprzeczny prętów bimetalowych wyciśniętych ze stopów aluminium. (Kazanowski i inni 2003b) (Długość materiału zewnętrznego jednakowa dla wszystkich przypadków -  $L_{zew} = 65$  mm, długości wyjściowe materiału wewnętrznego  $L_{wew}$ : a: 65 mm, b: 60 mm, c: 55 mm, d: 50 mm).



Rysunek 8. Metoda określania spójności materiałów w wyciśniętym przecie bimetalowym. (Kazanowski i inni 2003b).

Tabela 3. Podstawowe parametry procesu wyciskania prętów bimetalowych.

Wielkość	Wartość
Długość materiału zewnętrznego $L = L_2$	65 mm
Kolejne długości materiału wewnętrznego $L_1$	65, 60, 55 oraz 50 mm
Średnica wyjściowa materiału wewnętrznego $D_{wew}$	22 mm
Średnica pojemnika $D_0$	50 mm
Średnica otworu matrycy $D_1$	37,50 mm
Współczynnik wydłużenia $\lambda = D_0^2 / D_1^2$	6.25
Kąt roboczy matrycy $\alpha$	90°
Prędkość wyciskania (ruchu stempla) $v_0$	2,5 mm / s
Temperatura wlewka	~ 465°C



Rysunek 9. Wyniki pomiarów kąta spójności  $\Delta$  dla prętów wyciśniętych ze stopów aluminium.



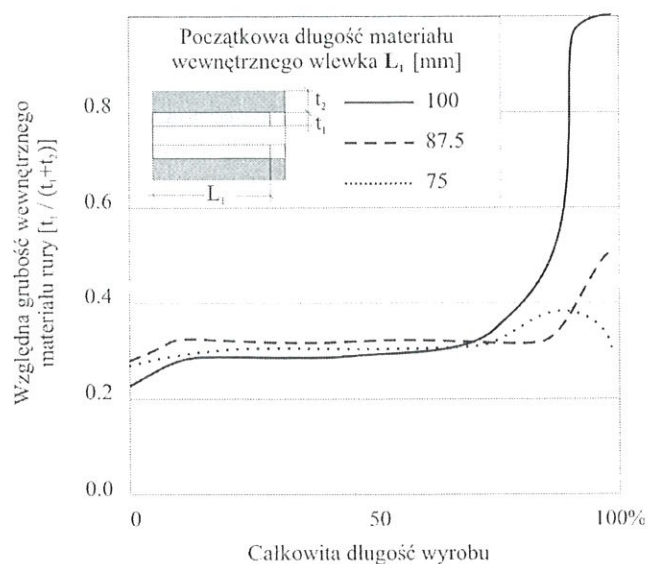
dzy materiałami niż ma to miejsce dla prętów dla których zmierzona wartość kąta  $\Delta$  jest ujemna.

## 4. DYSKUSJA WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

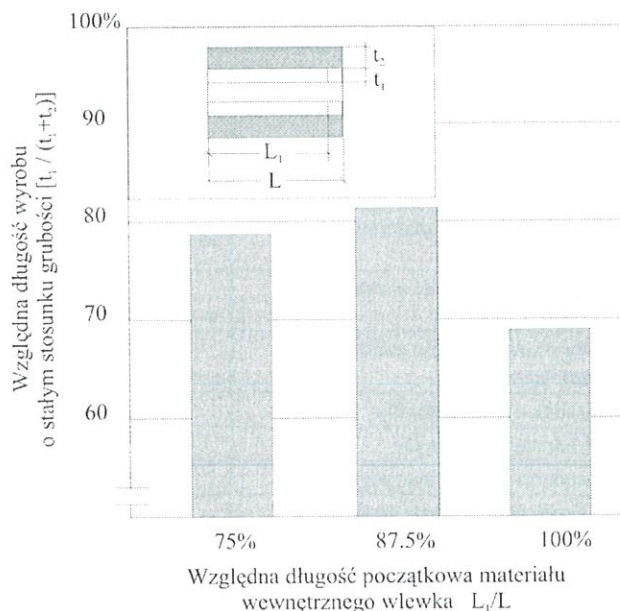
### 4.1. Wyciskanie rur bimateriałowych

Stateczność geometryczna przekroju poprzecznego rur bimetalowych wyciskanych z materiałów modelowych na trzpieniu była oceniana na podstawie stosunku grubości materiału zewnętrznego rury  $t_2$  do grubości materiału wewnętrznego  $t_1$  wyznaczonego w wyniku pomiarów na przekroju poprzecznym wyciśniętych rur. Pomiarów dokonano co 12,5 mm na całej długości wyrobu. Wyniki pomiarów zebrano na wykresie przedstawionym na rysunku 10. W przypadku wyciskania wlewka o jednakowej długości materiału zewnętrznego i wewnętrznego ( $L_1 = L_2$ ) można zauważyć, że ilość wyrobu o zadowalających parametrach stanowi nieco ponad 65% długości prasówki. Skrócenie początkowej długości materiału wewnętrznego wlewka o około 17%, powoduje zwiększenie długości wyrobu o stałym stosunku grubości materiału zewnętrznego do grubości materiału wewnętrznego mierzonym na przekroju poprzecznym, do ponad 80%. Dalsze skracanie materiału wewnętrznego wlewka nie przynosi już dodatkowych korzyści a nawet powoduje zmniejszenie uzysku, poniżej 80% co pokazano na rysunku 11.

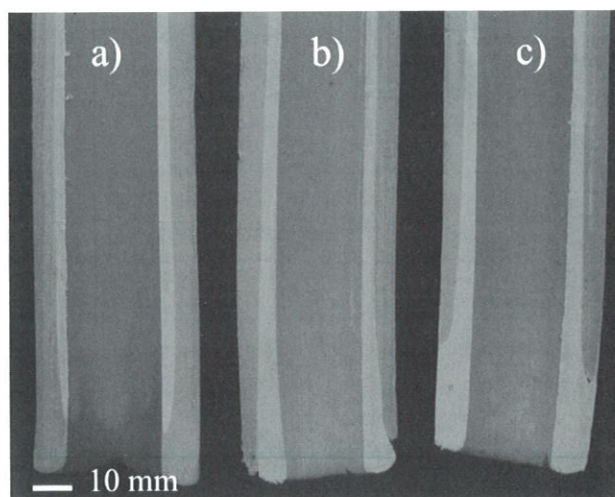
Porównanie przekrojów czołowej części rur wyciśniętych z wlewków o różnej długości początkowej materiału wewnętrznego  $L_1$  przedstawiono na rysunku 12. Podstawowe parametry procesu wyciskania rur bimetalowych na trzpieniu z użyciem materiału modelowego – plasteliny przedstawiono w Tabeli 4. Widać



Rysunek 10. Zmiana względnej grubości wewnętrznego materiału rury zmierzonej na długości wyrobu (Kazanowski i Misiołek, 2002a).



Rysunek 11. Względna długość wyrobu o stałym stosunku grubości materiału zewnętrznego do całkowitej grubości ścianki rury wyciśniętej z wlewków o różnej długości początkowej  $L_1$  (Kazanowski i Misiołek, 2002a).



Rysunek 12. Zestawienie wyników modelowania fizycznego wyciskania rur bimetalowych na trzpieniu dla różnych długości początkowych wewnętrznego materiału wlewka (Kazanowski i Misiołek, 2002a) (a):  $L_1 = 75$  mm, b):  $L_1 = 87,5$  mm oraz c):  $L_1 = L = 100$  mm).

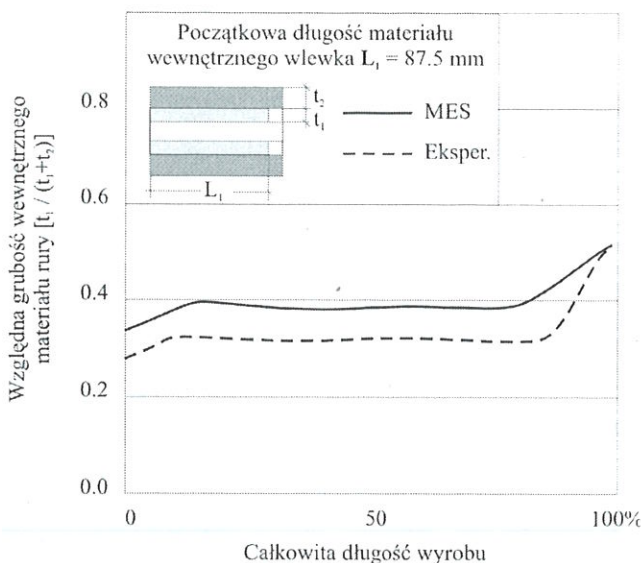
wyraźnie wpływ początkowej geometrii wlewka na stabilność geometryczną przekroju poprzecznego rury w postaci ilości materiału wewnętrznego obecnej w czołowej części produktu.

Wyniki obliczeń dokonanych pakietem bazującym na metodzie elementów skończonych porównano z wynikami modelowania fizycznego. Szczególny nacisk położono na porównanie wyników opisujących stabilność geometryczną przekroju poprzecznego rury bimetalowej wyciśniętej na trzpieniu. Na rysunku 13 zestawiono wyniki modelowania fizycznego oraz obliczeń dla przypadku, w którym początkowa długość materiału wewnętrznego wlewka wynosi  $L_1 = 87,5$  mm.



Tablica 4. Podstawowe parametry procesu wyciskania rur bi-metalowych na trzpieniu z użyciem materiału modelowego – plasteliny.

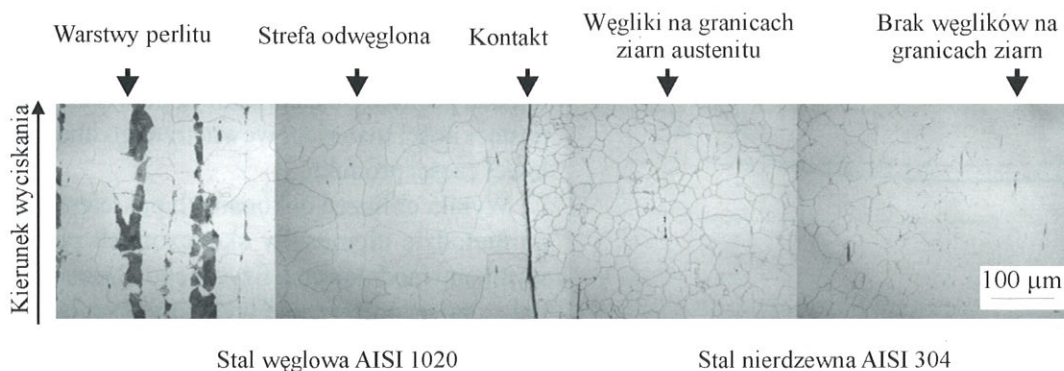
Wielkość	Wartość
Długość materiału zewnętrznego $L = L_2$	100 mm
Kolejne długości materiału wewnętrznego $L_1$	100, 82,5 oraz 75 mm
Wyjściowa grubość materiału wewnętrznego $t_1$	23,75 mm
Wyjściowa grubość materiału wewnętrznego $t_2$	12,50 mm
Średnica pojemnika $D_0$	93,75 mm
Średnica trzpienia $D_T$	21,25 mm
Średnica otworu matrycy $D_1$	37,50 mm
Współczynnik wydłużenia $\lambda = D_0^2 / (D_1^2 - D_T^2)$	9.20
Kąt roboczy matrycy $\alpha$	60°
Prędkość wyciskania (ruchu stempla) $v_0$	2,5 mm/s



Rysunek 13. Zestawienie wyników modelowania fizycznego oraz obliczeń metodą elementów skończonych. (Kazanowski i Misiotek 2002a).

Można stwierdzić, że wyniki obliczeń wskazują na mniejszą, niż w przypadku modelowania fizycznego, długość wyrobu o stałym stosunku grubości  $[t_1 / (t_1 + t_2)]$ . Widać również, że stosunek ten jest wyższy, czyli obliczona grubość materiału wewnętrznego rury jest większa od grubości wyznaczonej eksperymentalnie z użyciem materiałów modelowych.

Doświadczenie zdobyte w trakcie optymalizacji procesu wyciskania rur bimateriałowych metodami opisanymi poprzednio pozwoliło na zaprojektowanie serii wlewków o parametrach zestawionych w tabeli 5. Do produkcji wlewków użyto stali nierdzewnej AISI 304 jako materiału wewnętrznego oraz stali węglowej AISI 1020 jako materiału zewnętrznego. Doświadczenia przeprowadzono na poziomej prasie hydraulicznej o nośności 1250 ton zamontowanej w Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA. Parametry prędkościowo – temperaturowe procesu utrzymano na tym samym poziomie dla wszystkich przeprowadzonych prób. Po zakończonym eksperymencie przeprowadzono wstępną analizę jakościową mającą na celu sprawdzenie wpływu wyjściowej geometrii wlewka na geometrię gotowego wyrobu. Na podstawie fotografii zamieszczonych w tabeli 6 można z dużą dokładnością stwierdzić, że wlewki zawierające początkowo najmniejszą ilość stali nierdzewnej jako materiał wewnętrzny zapewniły stosunkowo najmniejszą ilość odpadu. Stwierdzenie to jest obecnie weryfikowane dokładnymi badaniami przekroju poprzecznego wyciśniętej rury. Obok analizy stabilności geometrycznej przekroju poprzecznego i wzdłużnego wyciśniętej rury badano również metalurgiczną spójność wyciśniętego wyrobu. Otrzymane bardzo interesujące wyniki zaprezentowano na rysunku 14. Topografia strefy kontaktu jest bardzo złożona. Można zaobserwować zanikające warstwy perlitu w stali węglowej płynnie przechodząc do strefy odwęglonej bezpośrednio przylegającej do kontaktu. W stali nierdzewnej natomiast, strefa bezpośrednio przylegająca do kontaktu charakteryzuje się obecnością węglików na granicach ziarn austenitu które



Rysunek 14. Topografia strefy kontaktu między stalą węglową AISI 1020 a stalą nierdzewną AISI 304 utworzonego podczas jednoczesnego wyciskania.

zanikają w miarę oddalania się od kontaktu.

## 4.2. Wyciskanie prętów bimetalowych

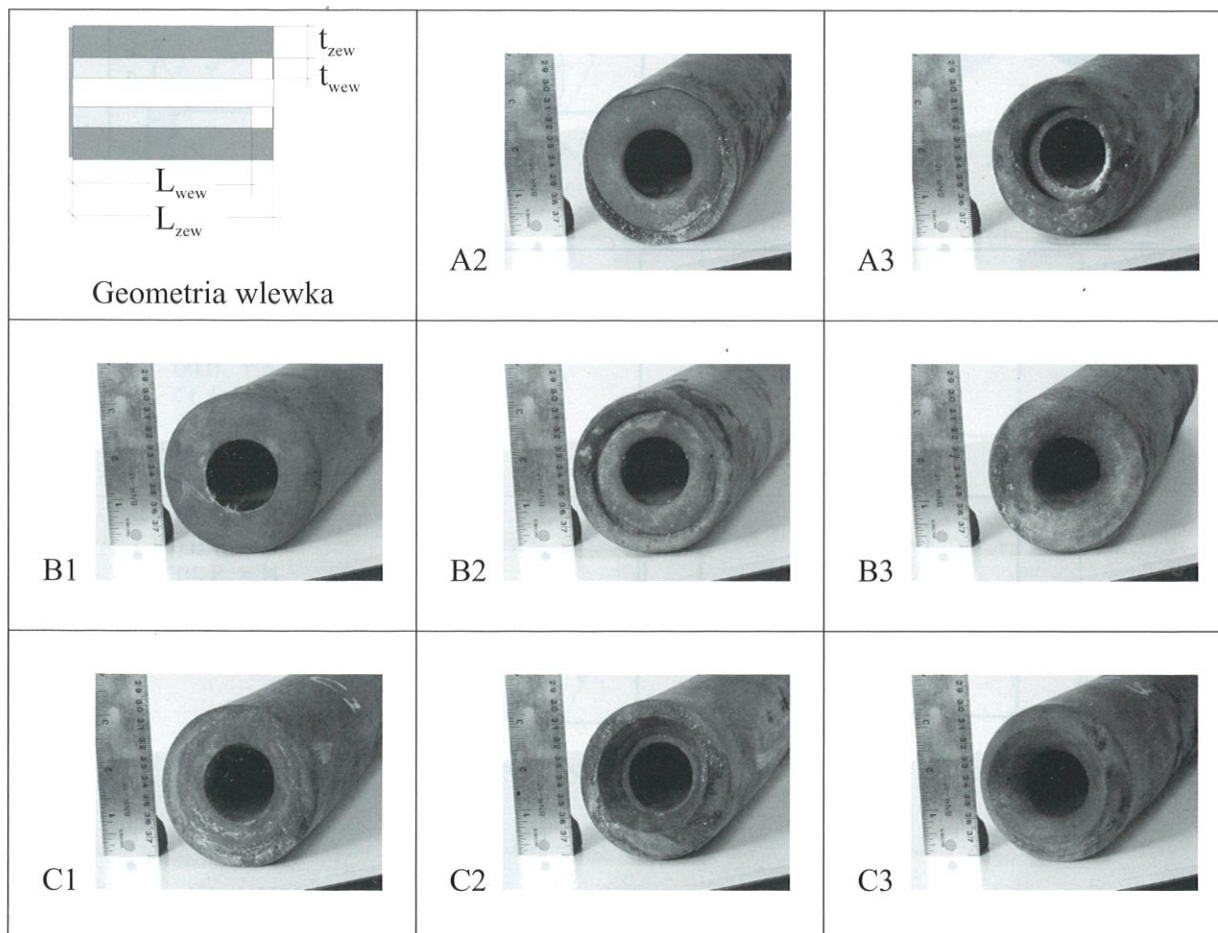
Jak wspomniano poprzednio, celem obliczeń numerycznych była analiza pola prędkości i naprężeń towarzyszących wyciskaniu prętów bimetalowych. Spójność bimetalowego pręta zależy od rozkładu prędkości w wyciskanych metalach. W idealnym przypadku, prędkości materiału po obydwu stronach strefy kontaktu

powinny być identyczne. W przeciwnym przypadku, różnica w prędkości płynięcia materiałów prowadziła by do powstania stanu naprężeń ścinających, które w skrajnym przypadku mogłyby doprowadzić do rozdzielania wyciskanych materiałów w gotowym wyrobie. Odmianą zaletą współczesnych programów do modelowania numerycznego jest ich zdolność do prezentowania wyników obliczeń w bardzo różnorodny sposób. Na rysunku 15 zaprezentowano wyliczone pakietem DEFORM™ 3D kolejne pola prędkości

Tablica 5. Podstawowe parametry wyciskania rur stalowych na trzpieniu.

	Grubość materiału wewnętrznego $t_{wew}$ [mm]	Grubość materiału zewnętrznego $t_{zew}$ [mm]	Długość materiału wewnętrznego $L_{wew}$ [mm]	Temperatura [°C] / Czas nagrzewania [min]	Współczynnik wyciskania	Maksymalna siła [T]
A1+	37,5	10,5	125	1100/150	9,7	1128
A2	37,5	10,5	112,5	1100/150	3,16	745
A3	37,5	10,5	100	1100/150	3,16	766
B1	24	24	125	1100/120	3,16	724
B2	24	24	112,5	1100/120	3,16	766
B3	24	24	100	1100/120	3,16	~740
C1	10,5	37,5	125	1100/120	3,16	681
C2	10,5	37,5	112,5	1100/120	3,16	702
C3	10,5	37,5	100	1100/120	3,16	702

Tabela 6. Zestawienie wyników wyciskania rur stalowych na trzpieniu dla warunków procesu przedstawionych w Tabeli 5.

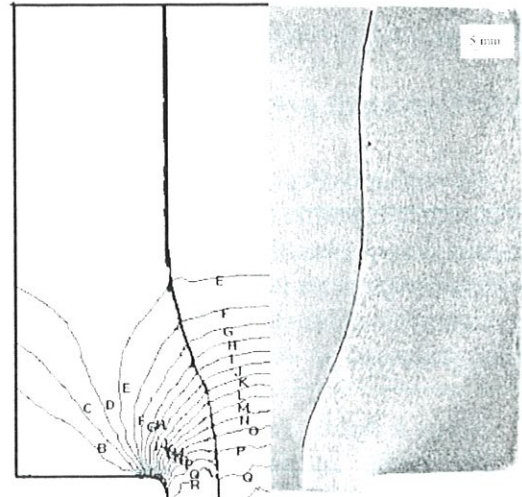




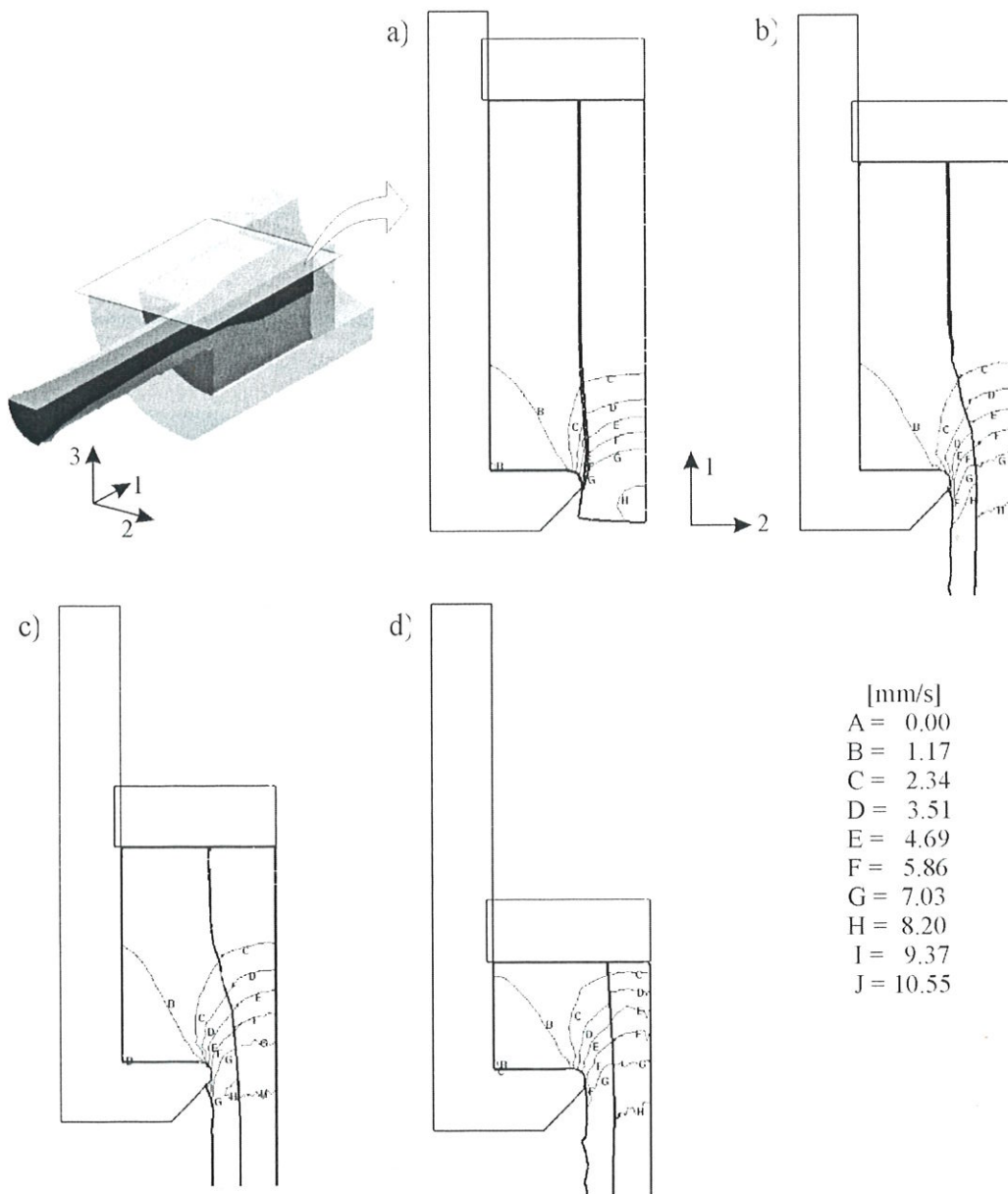
utworzone podczas wyciskania stopów aluminium. Izolinie pola prędkości przedstawione na wspomnianym rysunku wskazują, że wyznaczone pole prędkości jest polem jednorodnym, nie wykazującym nieciągłości lub gwałtownych skoków wartości. Można równocześnie zaobserwować charakterystyczne strefy tworzące się w wyciskanym wlewk. Kształt strefy martwej zmienia się w trakcie trwania procesu (Kiałka i Misiołek, 1996). W podobny sposób zmienia się kształt strefy martwej zaprezentowany na rysunku 15. Zaobserwowano również dużą zgodność między wynikami obliczeń i doświadczeń (rysunek 16) w zakresie kształtu strefy martwej utworzonej podczas wyciskania prętów bimetalowych.

Naprężenia panujące w pojemniku podczas wyciskania wpływają na własności mechaniczne wyciskanego wyrobu. Tak samo jak w przypadku pola prędko-

[mm / s]  
 A = 0.0091  
 B = 0.4668  
 C = 0.9245  
 D = 1.3823  
 E = 1.8400  
 F = 2.2977  
 G = 2.7554  
 H = 3.2132  
 I = 3.6709  
 J = 4.1286  
 K = 4.5863  
 L = 5.0440  
 M = 5.5018  
 N = 5.9595  
 O = 6.4172  
 P = 6.8749  
 Q = 7.3327  
 R = 7.7904  
 S = 8.2481



Rysunek 16. Porównanie kształtu strefy martwej utworzonej w wyciskanym wlewk wyznaczonej numerycznie (lewo) oraz doświadczalnie (prawo).



Rysunek 15. Kolejne pola prędkości wyznaczone pakietem DEFORM™ 3D. (Kazanowski i inni, 2003b); (a – początkowa faza wyciskania, b oraz c – zakres ustalonego płynięcia metali, d – końcowa faza wyciskania).

ści, pole naprężeń towarzyszące wyciskaniu prętów bimetalowych powinno być jednorodne. Przedstawione na rysunku 17 pole naprężeń zostało wyznaczone pakietem DEFORM™ 3D w oparciu o powszechnie używaną definicję naprężeń średnich:

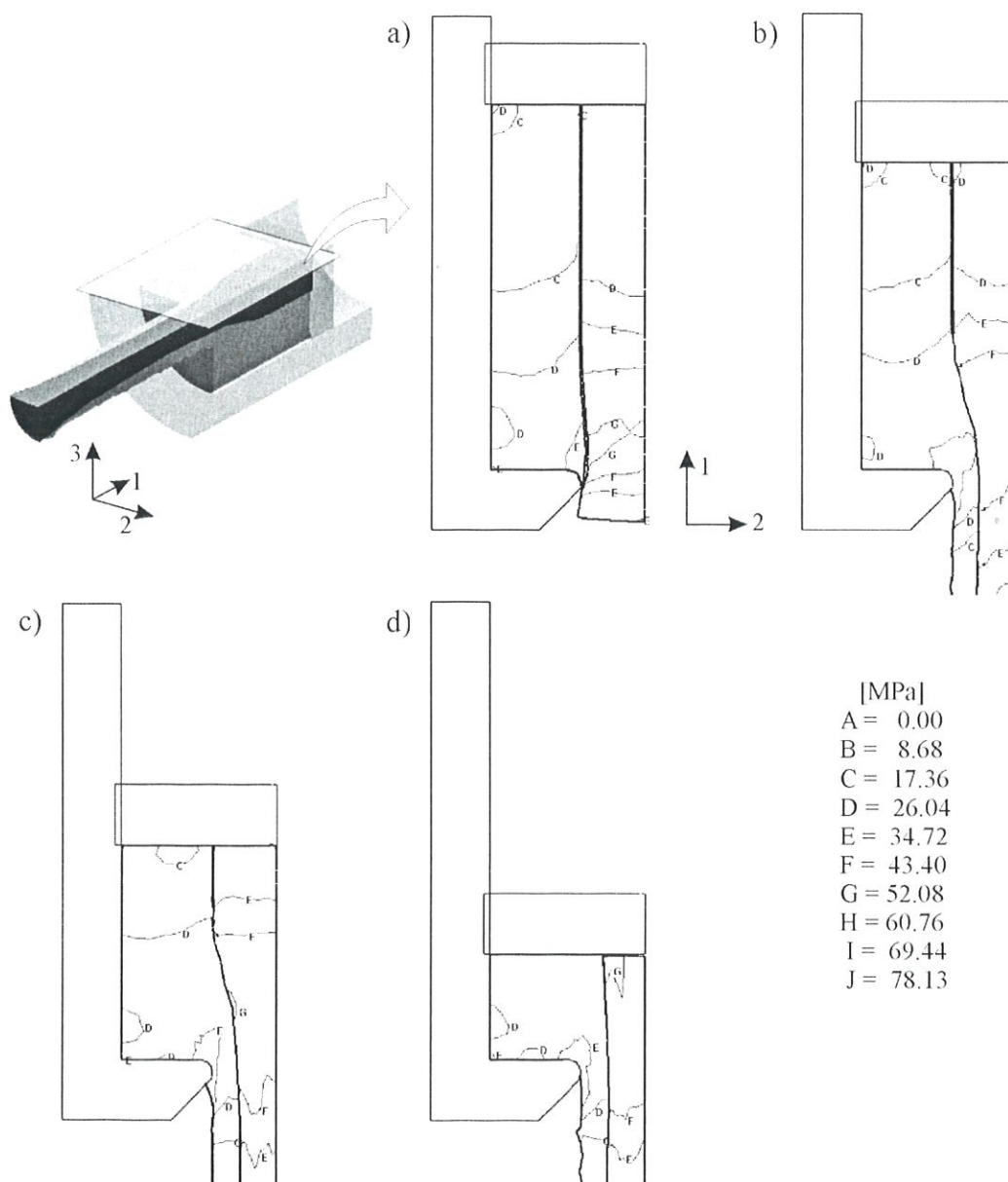
$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (8)$$

gdzie:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  oraz  $\sigma_3$  odpowiadają naprężeniom głównym.

Można zaobserwować, że stan naprężeń przedstawiony na rysunku 17 nie jest jednakowy w materiale zewnętrznym i wewnętrznym. Poziom naprężeń w materiale wewnętrznym znajdującym się w strefie odkształcenia wzrasta szybciej niż ma to miejsce dla materiału zewnętrznego. Uważna analiza stanu naprężeń w materiale wewnętrznym nasuwa skojarzenie ze

stanem naprężenia podobnym do występującego podczas ciągnięcia wyrobów pełnych. Aby w pełni określić stan naprężenia w wyciskanych materiałach należy określić obszary, w których naprężenia są rozciągające lub ściskające. W tym celu użyto funkcji generującej rozkład składowych stanu naprężenia w kierunku promieniowym (prostopadłym do osi wlewka) jak pokazano na rysunku 18. Znajomość wartości promieniowej składowej stanu naprężenia pozwoli ocenić, czy obszar kontaktu między wyciskanyymi materiałami jest cały czas pod wpływem naprężeń ściskających (pożądany efekt) czy nie. Wyliczone numerycznie pole naprężeń promieniowych wskazuje, że strefa kontaktu w wyciskany wlewku jest cały czas w stanie ściskania, prowadzącym do wysokiej spójności gotowego wyrobu.

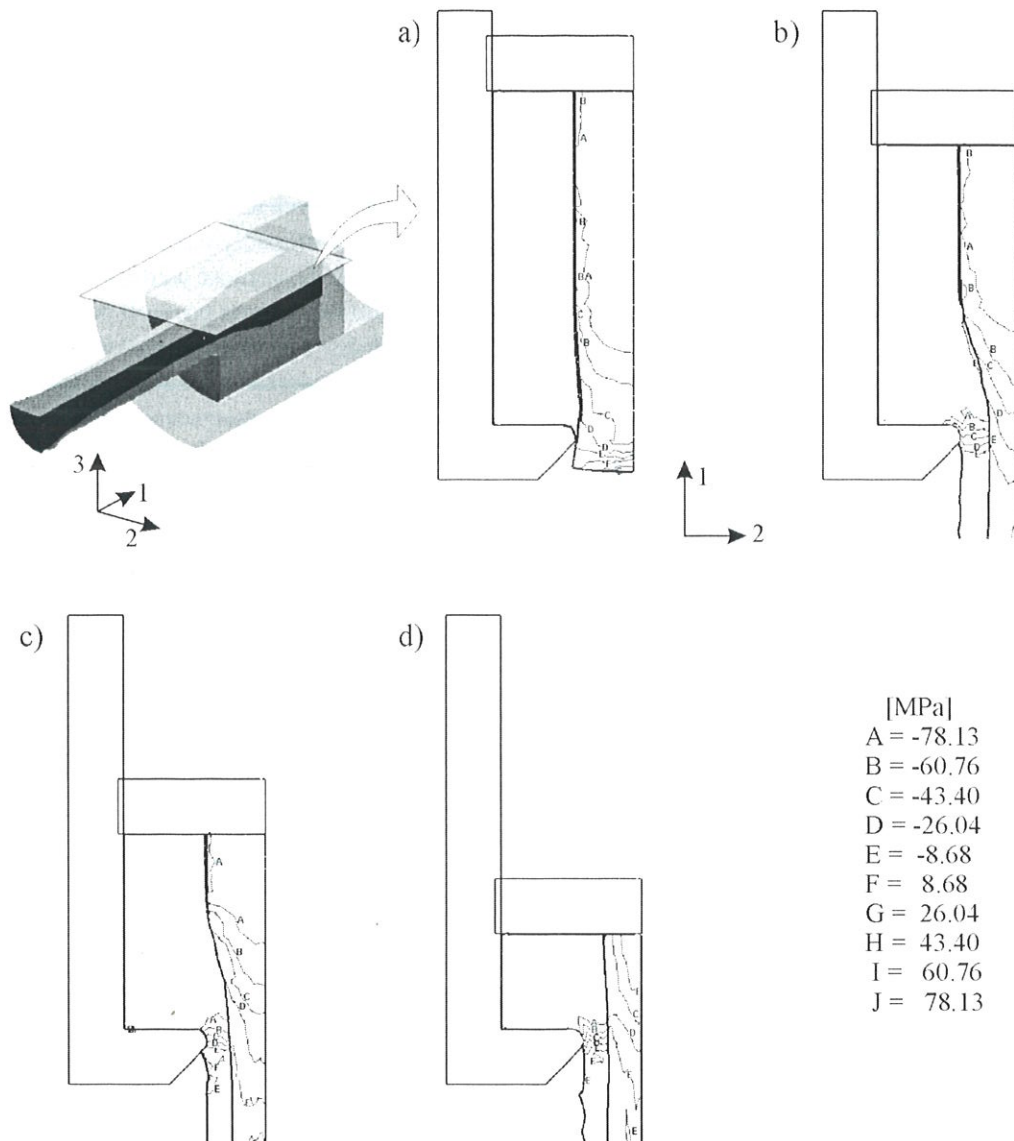
Obecna na rysunkach 17 i 18 nierówna powierzchnia zewnętrzna rury nie jest wynikiem nieprawidłowego



Rysunek 17. Kolejne pola naprężeń średnich wyznaczone pakietem DEFORM™ 3D. (Kazanowski i inni, 2003b); a – początkowa faza wyciskania, b oraz c – zakres ustalonego płynięcia metali, d – końcowa faza wyciskania.







Rysunek 18. Kolejne pola naprężeń promieniowych wyznaczone pakietem DEFORM<sup>TM</sup> 3D (Kazanowski i inni, 2003b); a – początkowa faza wyciskania, b oraz c – zakres ustalonego płynięcia metali, d – końcowa faza wyciskania.

modelowania procesu wyciskania metodą elementów skończonych. Szczegółowe modelowanie wymaga użycia bardzo dużej liczby elementów co pociąga za sobą znaczne wydłużenie czasu obliczeń na typowym komputerze klasy PC – z kilku godzin do kilku dni. Aby zrównoważyć czas niezbędny do przeprowadzenia obliczeń z zadowalającą rozdzielczością wyników przyjęto średnią ilość elementów. Średnia ilość elementów zapewnia osiągnięcie głównego celu modelowania jakim było wyznaczenie pól naprężeń. Nierówność konturu nie wpływa na jakość wyników modelowania otrzymanych pakietem DEFORM<sup>TM</sup>3D.

Badania metalograficzne wyciśniętych prętów bimetalowych poddano analizie metalograficznej w celu określenia topografii strefy kontaktu. Przedstawiony na rysunku 19 obszar kontaktu będący wynikiem jednoczesnego wyciskania dwóch stopów aluminium wskazuje na pewną niestabilność geometryczną oraz na skomplikowaną mikrostrukturę tak utworzonego połączenia.

## 5. PODSUMOWANIE

Osiągnięty został cel badań, jakim było przeanalizowanie wpływu wyjściowej geometrii wlewka na stabilność przekroju poprzecznego bimetalowego pręta pełnego oraz bimetalowej rury wyciskanej na trzpieniu. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji komputerowej dostarczyły danych, na podstawie których można wyznaczyć optymalną długość materiału wewnętrznego bimetalowego wlewka gwarantującą minimalny odpad i tym samym maksymalny uzysk. Długość wyrobu bimetalowego o zadowalającej jakości zależy od wielu czynników. W badaniach sprawdzono jedynie wpływ początkowej grubości i długości materiału wewnętrznego i zewnętrznego wlewka zakładając stały kąt matrycy  $\alpha = 90^\circ$ . Jednakże na podstawie wyników badań dostępnych w literaturze (Bandar i inni 2000) można stwierdzić, że wpływ kąta matrycy stożkowej na stabilność przekroju poprzecznego gotowego



Rysunek 19. Topografia strefy kontaktu między stopem AA2014 a stopem AA6063 utworzonym podczas jednoczesnego wyciskania.

wyrobu nie jest tak silny jak wpływ skrócenia długości materiału wewnętrznego wlewka.

Próby na prasach doświadczalnych posłużyły do weryfikacji dotychczas otrzymanych wyników analizy numerycznej oraz metodą elementów skończonych. Generalnie można potwierdzić przydatność współczesnego oprogramowania do wspomaganie numerycznego optymalizacji procesu wyciskania rur i prętów bimetalowych. Stabilność geometryczna wyznaczona numerycznie jest bardzo podobna do stabilności osiągniętej doświadczalnie. Jednakże stabilność wymiarowa nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na jakość gotowego wyrobu. Jakość ta zależy w dużej mierze od spójności wyrobu będącej z kolei funkcją jednorodności mikrostruktury obszaru kontaktu. Jak zostało pokazane na przykładzie wyciskanych rur i prętów bimetalowych, rzeczywiste wyroby wykazują skomplikowaną topografię obszaru kontaktu. Zjawisko to jest na obecnym stanie wiedzy prawie niemożliwe do wyliczenia pakietami bazującymi na metodzie elementów skończonych.

Aby umożliwić tego typu obliczenia niezbędna jest bardzo dobra znajomość mecha-

nizmów stojących za zmianami strukturalnymi obserwowanymi w trakcie wyciskania prętów i rur bimetalowych. Wnikliwe badania prowadzone obecnie w Institute for Metal Forming na Lehigh University w Bethlehem, PA, USA mają między innymi na celu ustalenie powiązań między parametrami wyciskania prętów bimetalowych a własnościami gotowego wyrobu.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego, finansowanego przez U.S. Department of Energy, numer grantu DE-FC07-01ID14254. Wojciech Z. Misiołek pragnie podziękować Loewy Family Foundation za częściowe finansowanie stanowiska Loewy Professor na Lehigh University. Autorzy pragną również

podziękować Stevenowi Claves'owi za zasugerowanie koncepcji nowej geometrii wlewka.

## LITERATURA

- Alcaraz, J.L., Gil-Sevillano, J., Martinez-Esnaola J.M., 1996, A Fracture Condition Based on The Upper Bound Method for the Extrusion of Bi-Metallic Tubes, *J. Mat. Proc. Techno.*, 61, 265-274.
- Apperley, M.H., Sorrell, C.C., Crosky, A., 2000, The Coextrusion of Metal-Sheated High-Temperature Superconductors, *J. Mat. Proc. Techno.*, 102, 193-202.
- Avitzur, B., 1983, Handbook of Metal Forming Processes, John Wiley & Sons, New York.
- Bandar, A.R., Misiołek, W.Z., Kloske K.E., Jeong, T.H., 2000, Improving Flow in Soft-Core Bimaterial Billets, *Mat. Konf. 7th International Aluminum Technology Seminar*, Chicago, Illinois, 2, 223-227.
- Kazanowski, P., Libura, W., 1999, Theoretical and Experimental Analysis of Extrusion With Different Die Geometry, *Mat. Konf. Advanced Technology of Plasticity*, Nuremberg, 1845-1850.
- Kazanowski, P., Misiołek W.Z., 2002a, Badanie geometrycznej stateczności przekroju poprzecznego rur bimetalowych wyciskanych na trzpieniu, *Rudy Metale*, 47.
- Kazanowski, P., Misiołek W.Z., 2002b, Physical and Numerical Analysis of Extrusion Process for Production of Bi-metallic Tubes, U.S. Department of Energy Report No. DE-FC07-01ID14254.
- Kazanowski P., Misiołek W.Z., Sikka V.K., 2003a, Analysis of the Influence of the Initial Billet Geometry and Die Design on the Product Geometry During Bi-Material Tube Extrusion, *Mater. Sci. Forum*, 426-432, 3795-3800.
- Kazanowski P., Epler M.E., Misiołek W.Z., 2003b, Bi-Metal Rod Extrusion - Process and Product Optimization, *Mater. Sc. Eng. A* - artykuł zaakceptowany do druku.
- Kiałka, J., Misiołek W.Z., 1996, Studies of Dead Metal Zone Formation in Aluminum Extrusion, *Mat. Konf. 6th International Aluminum Technology Seminar*, Chicago, Illinois, 2, 107-111.
- Oh, S.I., Wu, W.T., Tang, J.P., Vedhanayagam, A., 1991, Capabilities and Applications of FEM Code DEFORM: The Perspective of the Developer, *J. Mater. Proc. Techno.*, 27, 25-42.
- Pearson, C.E., Smythe, J.A., 1931, The influence of Pressure and Temperature on the Extrusion of Metals, *J. Inst. Metals*, 45, 345-369.
- Prasad, Y.V.R.K., Sasidhara, S., Hot Working Guide - A Compendium of Processing Maps, *ASM International*, Materials Park, Ohio.
- Roberts, P.R., Ferguson, B.L., 1991, Extrusion of Metal Powders, *Internat. Mater. Rev.*, 36, 62-79
- Sasch, G., Eisbein, W., 1931, Power Consumption and Mechanism of Flow in the Extrusion Process, *Mitt. Material*, 16, 67-96.
- Siebel, E., Frangemeier, E., 1931, Research on Power Consumption in the Extrusion and Punching of Metals, *Mitt. K. W. Inst. fur Eisenforschung*, 13, 29-43.
- Śliwa, R., A test determining the ability of different materials to undergo simultaneous plastic deformation to produce metal composites, 1991, *Sci. Eng. A.*, 135, 259-266
- Śliwa, R., Plastic Zones in the Extrusion of Metal Composites, 1997, *J. Mat. Proc. Techno.*, 67, 29-35.
- Wieder, S., 1999, Introduction to Mathcad for Scientists and Engineers, McGraw Hill, New York.

Artykuł otrzymano 30 października 2003 r.

