

Stefan Szczepanik*, Marek Wojtaszek, Piotr Nikiel

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

* Corresponding author. E-mail: szczepan@metal.agh.edu.pl

Otrzymano (Received) 04.05.2010

WYBRANE WŁASNOŚCI WARSTWOWYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH OTRZYMANÝCH Z PROSZKÓW ŹELAZA I ALUMINIUM W PROCESIE KUCIA W MATRYCACH ZAMKNIĘTYCH

Przedstawiono wyniki badań kucia matrycowego materiałów warstwowych, otrzymanych z wyprasek wytworzonych z mieszanek proszków żelaza i aluminium przez prasowanie w temperaturze pokojowej lub ich wstępne zagęszczanie w wyniku kucia na gorąco w matrycy zamkniętej. Ocenie poddano wpływ składu chemicznego poszczególnych warstw, sposobu ich ułożenia w wyprasce oraz sposobu przetworzenia na wybrane właściwości tworzyw. Zastosowano warstwy o zmiennych udziałach masowych składników przy ich symetrycznym lub asymetrycznym ułożeniu w wyprasce. Formowanie tworzyw warstwowych realizowano przez kucie w matrycach zamkniętych w warunkach pseudoizotermicznych stemplami płaskimi lub kształtowymi. Badano próbki pobrane z odkuwek w stanie po kuciu płaskim stemplem oraz stemplem kształtowym, wyznaczając ich wytrzymałość na zginanie oraz na ściskanie w temperaturze pokojowej, w zależności od ich budowy oraz od sposobu ułożenia próbki w odniesieniu do kierunku przyłożenia siły podczas realizacji prób.

Słowa kluczowe: kompozyty wielowarstwowe, kucie na gorąco, metalurgia proszków, proszek aluminium, proszek żelaza, mieszanki, własności mechaniczne

CHOSEN PROPERTIES OF LAYER COMPOSITES OBTAINED FROM ALUMINIUM AND IRON POWDER BY HOT CLOSED-DIE FORGING

The aim of the research in this paper is to determine the influence of hot deformation of the layer preforms obtained from a mixture of iron and aluminium powders as well as the influence of layers geometry of hot consolidated layer composite samples on the density and some mechanical properties of these materials. The properties of materials after closed-die forging performs, obtained from mixtures of aluminum and iron powder using flat or shape punches are presented. Chemical composition of layers, their position in performs and forming method were investigated to evaluate properties of products. The position of layers in initial preforms were symmetrical and asymmetrical. Cold pressed layer performs were hot consolidated by close-die forging at 485°C, in quasi-isothermal conditions. Influence of the chemical composition of layers, their position during bend and compression tests were investigated.

Bend strengths of composite samples were in the range 197 to 230 MPa for specimens with symmetrical position of layers and 144 to 233 MPa for specimens with asymmetrical position of layers, depending on chemical composition and layer geometry and loading by test. Bend strengths of layer specimens taking from webs of shape forgings were 222÷231 MPa for symmetrical layer structure and 182÷271 MPa for asymmetrical layer structure.

The higher compression stress 260 MPa were for layer specimens with layer structure B-C-B. Additionally, some information about condition of contact surfaces between components give macrostructure observations. Distribution of components on cross-section, calculated using program Larstran Shape confirm qualitative macrostructure results observation and material flow during shapping. These data can contribute to design of layer materials for specific applications utilising the PM route and closed-die forging. The knowledge of specimen properties, as a function of the layers arrangement allows for choice the most favourable variant to design required properties of the product.

Keywords: multi-layer composites, powder metallurgy, aluminum powder, iron powder, hot closed-die forging, mechanical properties

WSTĘP

Warstwowe tworzywa kompozytowe charakteryzują się skokową zmianą charakterystyk materiałowych. Jest to związane z udziałem objętościowym składników, z których zbudowana jest poszczególne warstwa, oraz z udziałem objętościowym poszczególnych warstw i ich

ułożeniem w wyrobieniu, co determinuje jego funkcjonalność. Efekt ten może być wykorzystany w konstrukcjach, w których do ich właściwego funkcjonowania wymagane są zróżnicowane właściwości, np. materiały bimetalowe typu rdzeń-powłoka [1, 2] lub z modyfi-

kowaną warstwą wierzchnią, np. w wyniku nagniatania powierzchniowego [3]. Tak wykonane materiały mogą spełniać złożone funkcje, między innymi jako materiały konstrukcyjne.

Jedną z metod wytwarzania materiałów warstwowych jest wykorzystanie technologii metalurgii proszków. Stosując tę metodę, można w szerokim zakresie projektować skład chemiczny poszczególnych warstw i wykonać mieszanki z odpowiednio dobranych składników podstawowych, a z nich wypraski o założonej budowie. W celu uzyskania odpowiednich właściwości wyrobu dalsze formowanie może być realizowane w odpowiednio dobranej temperaturze w procesach kucia matrycowego [4]. W wyniku tych zabiegów otrzymuje się np. z mieszanek proszku żelaza i aluminium tworzywa konstrukcyjne o gęstości materiałów litych, w ich mikrostrukturze występują obszary złożone ze składników wyjściowych, a na ich powierzchni warstwy złożone z faz międzymetalicznych Fe-Al, których udział i skład zależy od temperatury odkształcania oraz parametrów zastosowanej obróbki cieplnej.

Właściwe zaprojektowanie wyprasek o zmiennym w objętości składzie chemicznym i wykonanie odkówek może także prowadzić do zmniejszenia masy konstrukcji lub obniżenia kosztów materiałowych. Uzyskanie wyrobów o odpowiednim kształcie jest możliwe w wyniku kucia z zastosowaniem narzędzi kształtowych. Dla wykorzystania możliwości, które wynikają ze stosowania tego typu tworzyw, istotną jest znajomość ich zachowania się podczas obciążenia siłami zewnętrznymi w zależności od składu chemicznego poszczególnych warstw i ich ułożenia w wyrobie. Wiedza taka umożliwi właściwe zaprojektowanie konstrukcji dla założonego charakteru jej pracy.

BADANIA WŁASNE

Materiał do badań i metodyka wykonania próbek. Materiałami wyjściowymi do badań były proszki aluminium oraz żelaza otrzymane metodą rozpylania. Proces mieszania składników prowadzono w temperaturze pokojowej, na sucho i bez środków poślizgowych. Wytypowane do badań udziały poszczególnych proszków oraz przyjęte oznaczenia ich mieszanek zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Skład chemiczny i oznaczenia mieszanek proszków
TABLE 1. Chemical composition of powder mixtures and their designations






Oznaczenie mieszaniny	Udział proszków, % masowe	
	żelazo	aluminium
A	10	90
B	30	70
C	40	60

Mieszanki umieszczono warstwami w matrycy o średnicy 48 mm w układach symetrycznych oraz niesymetrycznych. Przyjęte sposoby ułożenia wzglę-

dem siebie warstw i ich udziały określone w procentach objętościowych zestawiono w tabeli 2. Kolejność zapisu symboli mieszanek w tej tabeli jest zgodna z kolejnością wprowadzania poszczególnych warstw mieszanek do wykroju matrycy.

TABELA 2. Sposoby lokowania warstw i ich udziały w próbkach kompozytowych

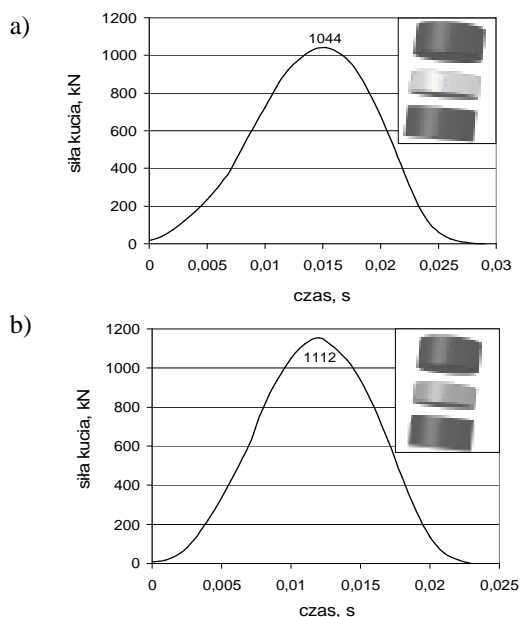
TABLE 2. Positions of layers and their volume contents in the composite preforms

Układ warstw	Rodzaj układu	Udziały warstw % obj.	Schemat budowy próbki
B-C-B	symetryczny	33,3 33,3 33,3	
C-B-C		33,3 33,3 33,3	
A-B	niesymetryczny	75,0 25,0	
A-C		75,0 25,0	
A-B-C		50,0 25,0 25,0	

Warstwowe układy mieszanek prasowano w temperaturze pokojowej, stosując nacisk jednostkowy 220 MPa. Dla porównania wykonano w ten sam sposób wypraski z mieszanek A i B. Wypraski umieszczano w piecu nagrzanym do temperatury 485°C, przetrzymywano przez 30 minut, następnie przenoszono do wykroju podgrzewanej matrycy i kuto. Wyznaczono wybrane własności tak otrzymanych materiałów. Część odkówek przeznaczono do kucia stemplami kształtowymi, prowadząc ten proces przy tych samych parametrach, jakie zastosowano w przypadku kucia wyprasek.

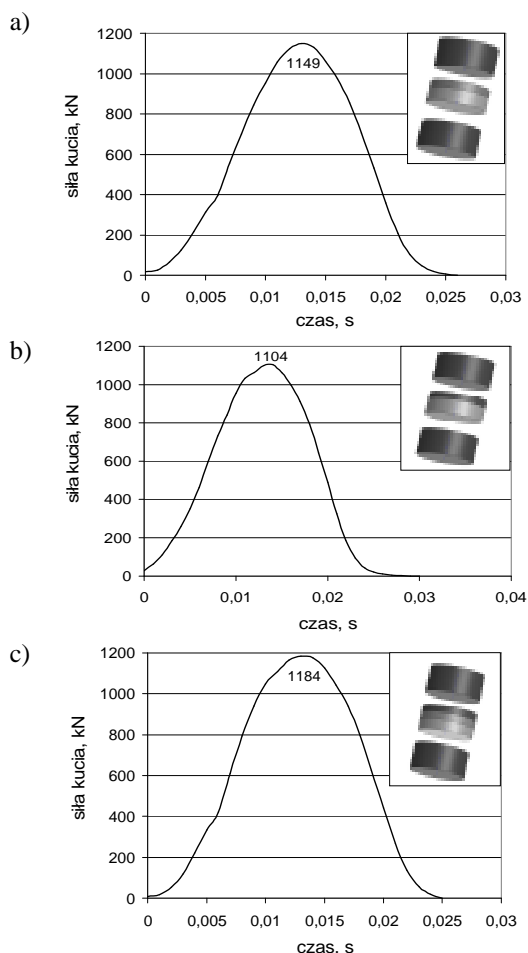
Z odkówek w stanie po kuciu płaskim stemplem oraz stemplem kształtowym pobrano próbki do badań. Określono ich wytrzymałość na zginanie i ściskanie. Oceniano wpływ składu chemicznego warstw, metody ich rozlokowania i sposobu ułożenia próbki względem kierunku przyłożenia siły podczas realizacji prób na wyznaczane wartości.

Badania procesu kucia. Podczas kucia w matrycach zamkniętych rejestrowano przebiegi zmian siły podczas realizacji tego procesu. Pomiar prowadzono z częstotliwością próbkowania 1000 Hz. Pomiar te umożliwiły uzyskanie informacji o wpływie składu chemicznego warstw, ich rozlokowania w wyprase na przebieg zmian siły podczas kucia płaskimi stemplami (rys. 1, 2) oraz stemplami kształtowymi (rys. 3).



Rys. 1. Zmiany siły podczas kucia w temp. 485°C z użyciem płaskich stempli wyprasek z mieszanek: a) oznaczonej A, b) oznaczonej B

Fig. 1. Force vs time during closed-die forging at 485°C of performs from: a) material A, b) material B - as annotated in Table 2

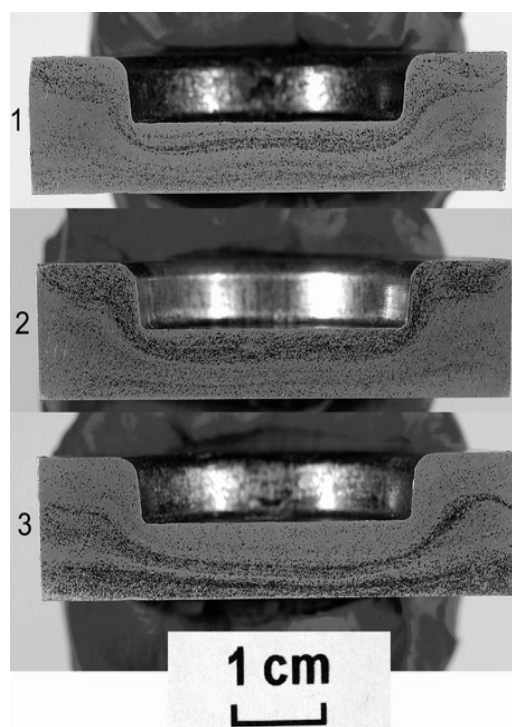


Rys. 2. Przebiegi siły podczas kucia z użyciem płaskich stempli wyprasek ze wstępnie zagęszczonych na gorąco warstwowych kompozytów w temperaturze 485°C. Układ warstw w wyprase: a) AB, b) AC, c) ABC (A, B, C skład chemiczny warstw oznaczony w tabeli 2)

Fig. 2. Force vs time during closed-die forging with flat punch at 485°C of hot consolidated layer preforms: a) AB, b) AC, c) ABC (A, B, C layers as annotated in Table 2)

Otrzymane w wyniku kucia wyroby mają gęstości materiałów litych. Część otrzymanych odkuwek przeznaczono do badań właściwości mechanicznych, pozostałe do wytworzenia odkuwek matrycowych.

Na rysunku 3 przedstawiono makrostruktury odkuwek kształtowych, uzyskanych w wyniku płynięcia materiału z udziałem spęczania w matrycy połączonego z wyciskaniem przeciwbieżnym. Uwidoczniona jest warstwowa budowa odkuwek z zachowaniem ciągłości materiału. Pomimo lokalnie intensywnego płynięcia materiału w strefie środkowej występuje spójność materiałów i dobre połączenie warstw, niezależnie od ich składu chemicznego i budowy wypraski.

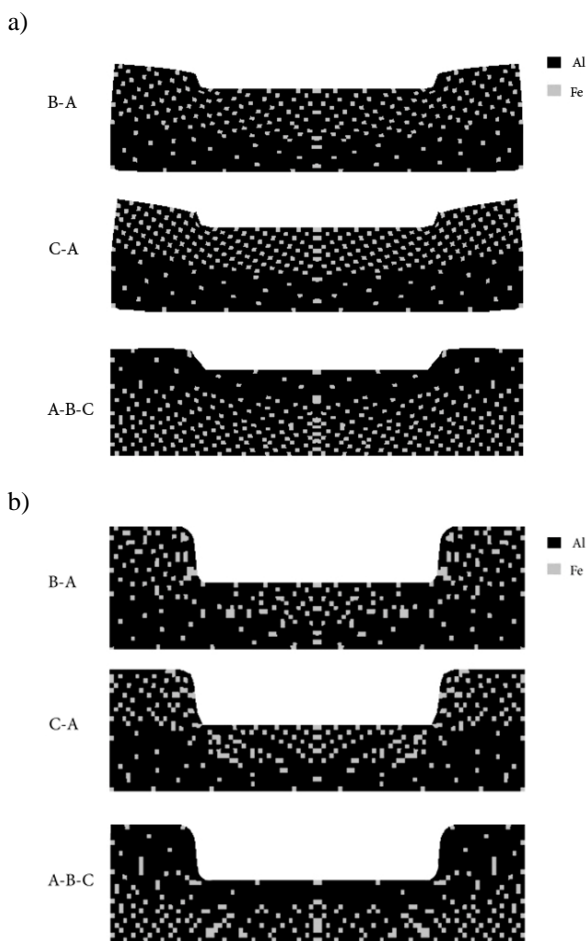


Rys. 3. Makrostruktury odkuwek kształtowych wykonanych z próbek warstwowych Fe-Al: 1 - układ warstw CBC, 2 - układ warstw CBA, 3 - układ warstw ABC

Fig. 3. Macrostructure of shape forgings with layer positions: 1 - CBC, 2 - CBA, 3 - ABC

Możliwość uzyskania dobrej jakości wewnętrznej odkuwek potwierdzają symulacje metodą elementów skończonych z zastosowaniem programu Larstran Shape [5]. Opis zastosowania tego programu do analizy płynięcia metalicznych materiałów wieloskładnikowych przedstawiono w pracy [6].

Wyniki symulacji kucia matrycowego, których celem było uzyskanie informacji o rozłożeniu składników kompozytów w poszczególnych warstwach i w całej ich objętości, pokazano na rysunku 4. Przedstawiają one rozłożenie składników na przekroju odkuwek w połowie oraz w końcowym etapie obliczeń procesu kucia. Wyniki te są jakościowo porównywalne z płynięciem materiału ujawnionym na makrostrukturach zaprezentowanych na rysunku 3.



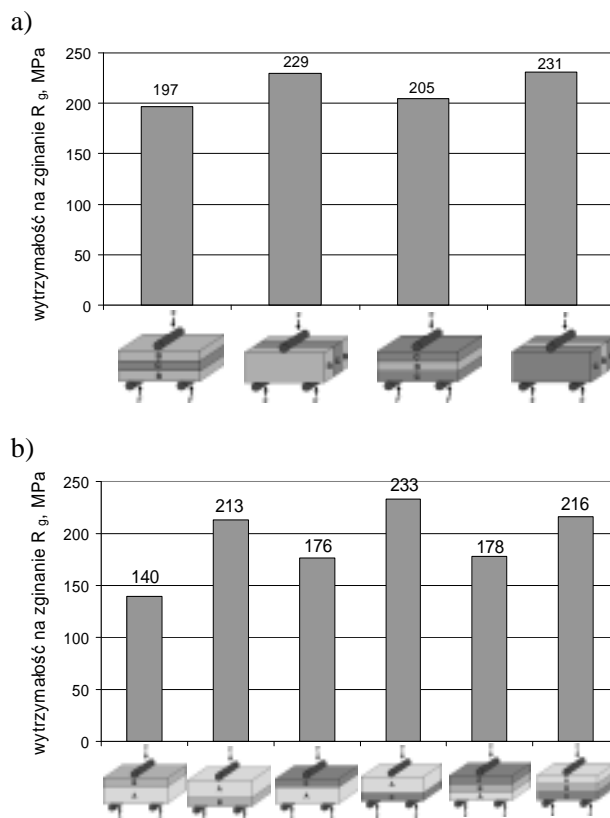
Rys. 4. Rozmieszczenie żelaza i aluminium na przekroju warstwowych kompozytów, uzyskane w wyniku symulacji programem Larstran Shape: a) po 65 krokach obliczeń, b) w końcowym etapie kucia

Fig. 4. Distribution simulated by Larstran Shape program of aluminium and iron in layer of composites: a) after 65 in the forging calculation, b) at completion

WYNIKI BADAŃ

Wytrzymałość na zginanie. Badania wytrzymałości na zginanie prowadzono w próbie trójpunktowej, realizowanej w taki sposób, aby umożliwić ocenę wpływu ułożenia warstw w próbce w odniesieniu do kierunku działania siły. Schematy przedstawiające skład i ułożenie próbek podczas badań oraz odpowiadające im średnie wartości wytrzymałości na zginanie R_g dla tworzyw kutech z wykorzystaniem płaskich stempli, odpowiednio, dla układów symetrycznych zestawiono na rysunku 5a, a dla niesymetrycznych układów na rysunku 5b. Dla wyrobów kutech z użyciem kształtowych stempli wykonano próbki z materiału pobranego w obszarze denka odkuwki. Schematy przedstawiające ułożenie warstw w badanych próbkach po kuciu kształtowym oraz otrzymane dla nich wartości R_g przedstawiono odpowiednio dla próbek z symetrycznym ułożeniem warstw na rysunku 6a, a dla niesymetrycznego ułożenia na rysunku 6b. Ocenę wpływu sposobu ułożenia warstw na zachowanie się wykonanych próbek podczas próby zginania z niesymetrycznym ich ułożeniem przeprowa-

dzono przy obciążeniu siłą równoległą do gradientu składu chemicznego (rys. rys. 5b, 6b). W przypadku próbek o symetrycznej budowie i kutech z użyciem płaskich stempli prowadzono próbę przy obu sposobach ułożenia warstw względem przyłożonej siły (rys. 5a). Próby dla tych materiałów po kuciu w kształtowych matrycach ograniczono do układów o prostym ułożeniu warstw względem kierunku obciążenia próbek (rys. 6b).

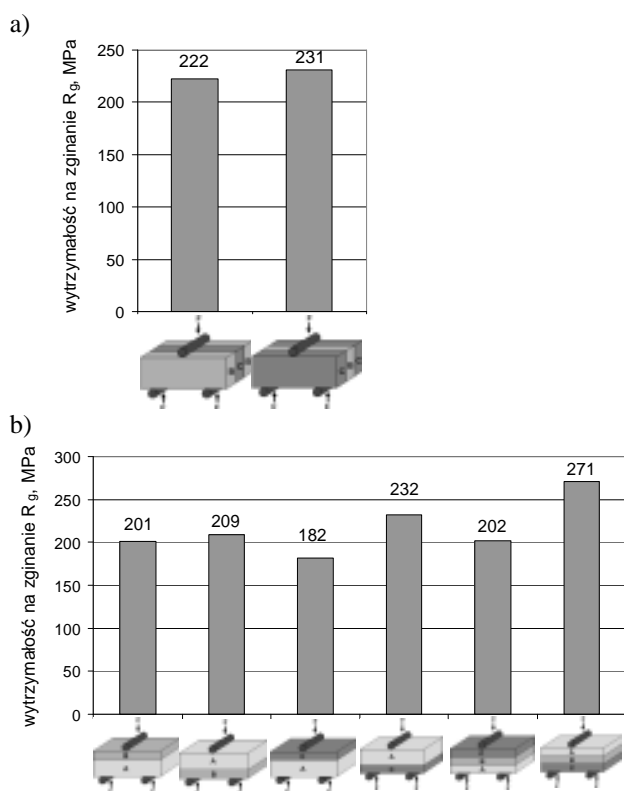


Rys. 5. Wytrzymałość na zginanie próbek kompozytowych o oznaczeniach warstw A, B, C podanych w tabeli 2 i sposób obciążenia podczas zginania dla materiałów: a) o symetrycznej budowie, b) o asymetrycznej budowie. Materiał po kuciu w matrycy zamkniętej w temperaturze 485°C

Fig. 5. Bend strengths of layer specimens A, B, C - with layers marked as designed in Table 2 and their loading during bend testing for performs with: a) symmetrical layer structure, b) asymmetrical layer structure. Material after closed-die forging at 485°C

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, iż w przypadku materiałów warstwowych o budowie symetrycznej, kutech z użyciem płaskich stempli, wartości wytrzymałości na zginanie są wyższe przy ułożeniu warstw prostopadle do kierunku przyłożenia siły podczas badań (rys. 5a). Nie stwierdzono różnic wytrzymałości na zginanie próbek, których zewnętrzne warstwy zawierają mniejszy lub większy udział żelaza, tj. między układami o budowie typu B-C-B oraz C-B-C. Dla kształtowanych w ten sam sposób kompozytów o niesymetrycznej budowie warstw (rys. 5b) stwierdzono wyższe wartości R_g w każdym przypadku dla układów, w których warstwa o większej zawartości żelaza znajdowała się od spodu. W takim przypadku podczas

zginania obserwowano kruchy charakter pęknięcia tworzyw. Próbkę ułożone w taki sposób, aby warstwa o większej zawartości żelaza znajdowała się u góry podczas próby odkształcały się plastycznie. W przypadku materiałów warstwowych o budowie symetrycznej powtórne ich przekucie w kształtowych matrycach nie spowodowało zmiany w wytrzymałości na zginanie w obszarze denka (rys. rys. 5a i 6a). Dla próbek niesymetrycznych stwierdzono zwiększenie wytrzymałości na zginanie dla układów trzech warstw, to jest A-B-C i C-B-A, niezależnie od ich ułożenia podczas próby, oraz dla próbki dwuwarstwowej A-B w przypadku, gdy warstwa twarda znajdowała się u góry (rys. rys. 5b i 6b). Dla pozostałych próbek wartości wytrzymałości na zginanie w obszarze denka odkuwki nie uległy istotnym zmianom w wyniku ich przekucia w kształtowych matrycach.



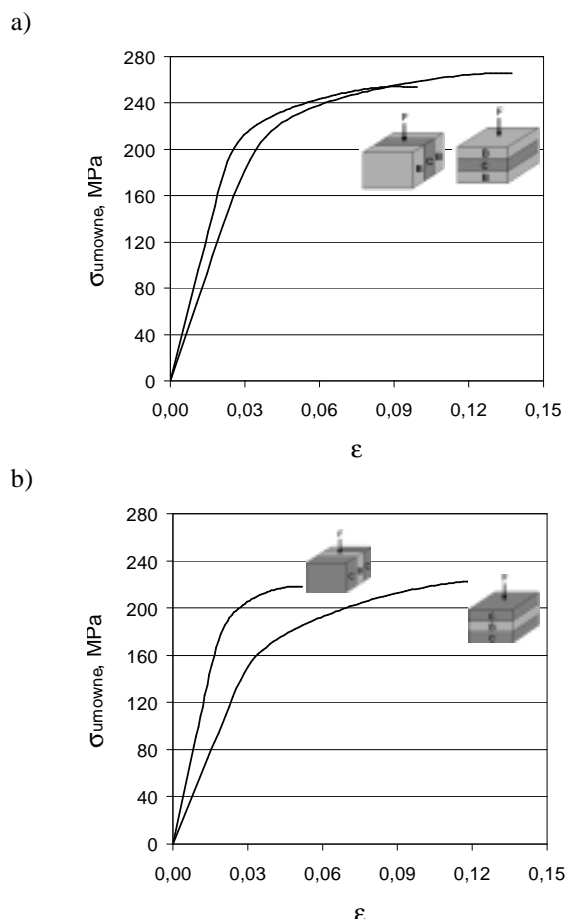
Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie kompozytów o oznaczeniach warstw A, B, C podanych w tabeli 2, w zależności od sposobu obciążenia podczas zginania próbek: a) o symetrycznej budowie, b) o asymetrycznej budowie. Próbkę pobrano z denka odkuwek kształtowych otrzymanych w wyniku kucia w matrycy zamkniętej w temperaturze 485°C

Fig. 6. Bend strengths of layer specimens A, B, C - with layers marked as annotated in Table 2 and their loading during bend testing for performs with: a) symmetrical layer structure, b) asymmetrical layer structure. Specimens were taking from webs of shape forgings, obtained by closed-die forging at 485°C

Charakter zniszczenia podczas zginania próbek po kuciu z wykorzystaniem stempli kształtowych w większości przypadków nie uległ zmianie w porównaniu do odpowiednich próbek kutych płaskimi stemplami. Wyjątek stanowiła próbka trójwarstwowa, gdy warstwa o najmniejszej zawartości żelaza znajdowała się u dołu

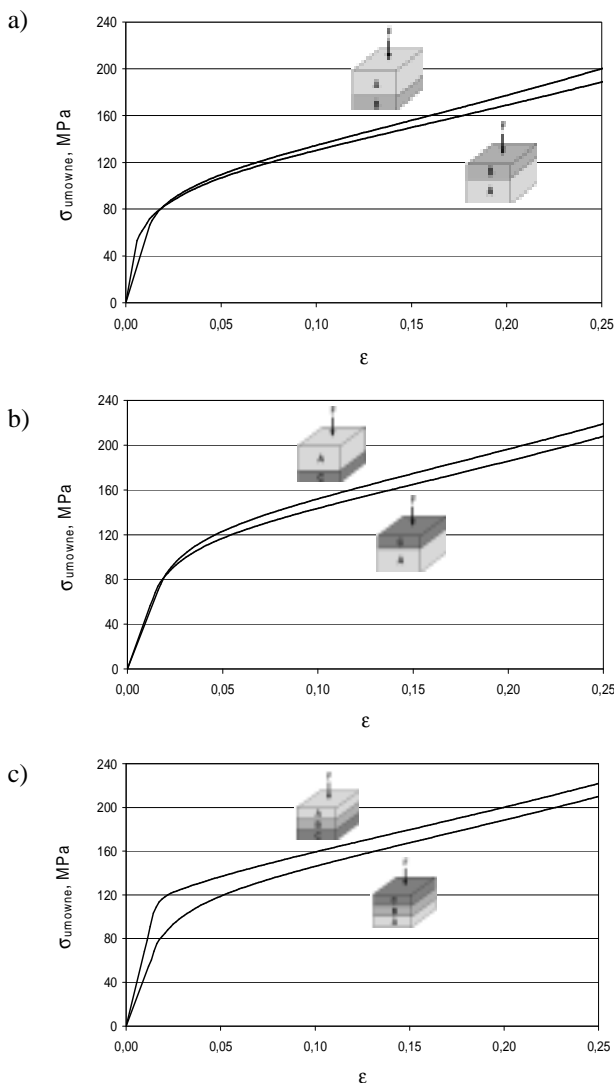
(A-B-C), gdzie zaobserwowano zmianę charakteru zniszczenia z plastycznego na kruchy.

Zależności naprężenie-odkształcenie określone w próbie ściskania. Ściskanie prowadzono w temperaturze pokojowej z prędkością trawersy $0,08 \cdot s^{-1}$. Do badań przygotowano próbki prostokątne z materiału w stanie po kuciu z wykorzystaniem płaskich stempli. W przypadku próbek symetrycznych ściskanie prowadzono przy ułożeniu warstw wzdłużnym oraz poprzecznym w odniesieniu do kierunku siły ściskania, dla niesymetrycznych układów badano wpływ kolejności warstw przy poprzecznym ich ułożeniu w odniesieniu do kierunku działania siły. Mierzono drogę odkształcenia i odpowiadającą jej wartość siły. Dane z próby rejestrowano z częstotliwością 5 Hz. Na podstawie uzyskanych danych opracowano krzywe przebiegu zmian wartości naprężenia umownego w funkcji względnego odkształcenia. Schematy przedstawiające skład chemiczny i sposoby ułożenia warstw podczas próby oraz otrzymane w efekcie krzywe zestawiono dla układów warstw symetrycznych na rysunku 7, a dla niesymetrycznych na rysunku 8.



Rys. 7. Zmiana naprężenia umownego w zależności od odkształcenia i sposobu obciążenia podczas ściskania warstwowych próbek kompozytowych o oznaczeniach warstw A, B, C podanych w tabeli 2 dla materiałów o symetrycznej budowie. Materiał po kuciu w matrycy zamkniętej w temperaturze 485°C

Fig. 7. Engineering stress vs displacement during compression test of layer composite specimens, A, B, C - layers marked as annotated in Table 2 and their loading during bend testing of performs with asymmetrical layer structure. Closed-die material at 485°C



Rys. 8. Zmiana naprężenia umownego w zależności od odkształcenia i sposobu obciążenia podczas ściskania warstwowych próbek kompozytowych o oznaczeniach warstw A, B, C podanych w tabeli 2 dla materiałów o asymetrycznej budowie. Materiał po kuciu w matrycy zamkniętej w temperaturze 485°C

Fig. 8. Engineering stress vs displacement during compression test of layer composite specimens, A, B, C - layers marked as annotated in Table 2 and their loading during bend testing of performs with asymmetrical layer structure. Material closed-die forged at 485°C

W przypadku próbek o symetrycznym ułożeniu warstw (rys. 7) obserwowano wyższe wartości naprężenia rzeczywistego przy danym odkształceniu dla materiałów, których wewnętrzna warstwa wykonana została z mieszanki o większej zawartości żelaza (mieszanka C), a zewnętrzne warstwy o większym udziale aluminium (mieszanka B). Dla próbek o ułożeniu warstw równoległe do kierunku działania siły przyrost naprężenia rzeczywistego oraz zniszczenie próbek następowały przy większych wartościach odkształceń. Wyniki otrzymane podczas badań próbek o niesymetrycznym ułożeniu warstw (rys. 6) pokazują, że zwiększenie zawartości żelaza w twardszej warstwie z 30% (próbka typu A-B) do 40% (próbka typu A-C) powodowało odkształcenie przy wyższych wartościach naprężeń rzeczywistych dla dwuwarstwowych próbek (rys. 8a,

b). W przypadku próbek trójwarstwowych przebieg krzywych był porównywalny do otrzymanego dla próbek typu A-C (rys. 8b, c). Niezależnie od składu chemicznego i ilości warstw ułożenie warstw o większej zawartości żelaza na dole ściskanego układu skutkowało zwiększeniem wartości naprężeń rzeczywistych (rys. 8).

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań wybranych właściwości i mechaniki materiałów warstwowych, otrzymanych z mieszanin proszków żelaza i aluminium w procesach kucia z wykorzystaniem płaskich oraz kształtowych stempli, stwierdzono, że:

- Zachowanie się materiałów warstwowych podczas formowania oraz właściwości wykonanych z nich konstrukcji mogą być sterowane przez dobór składu chemicznego poszczególnych warstw oraz sposobu ich ułożenia w wyrobie w odniesieniu do kierunku obciążenia.
- Próbki warstwowe o budowie symetrycznej, otrzymane z odkutek kształtowanych z użyciem płaskich stempli, mają wyższe wartości wytrzymałości na zginanie przy ułożeniu warstw równoległym do kierunku przyłożenia siły. Natomiast kompozyty o niesymetrycznej budowie warstw mają wyższe wartości wytrzymałości na zginanie w przypadku, gdy warstwa o większej zawartości żelaza znajduje się od spodu. Sposób ułożenia próbki ma wpływ na przebieg pęknięcia podczas obciążenia. Wyniki uzyskane podczas zginania próbek po kuciu stemplami kształtowymi są porównywalne do wyników otrzymanych dla próbek kutek płaskimi stemplami.
- Wyższe wartości naprężenia rzeczywistego podczas ściskania obserwowano dla próbek o symetrycznym ułożeniu warstw, w których wewnętrzne warstwy wykonano z mieszanki kompozytowej o większej zawartości żelaza. Wyższe są wartości naprężenia rzeczywistego podczas ściskania próbek o ułożeniu warstw wzdłużnie do kierunku działania siły, a zniszczenie odbywało się przy większych wartościach odkształceń. Próbki o niesymetrycznym układzie warstw, ułożone warstwą o większej zawartości żelaza na dole ściskanego układu, mają większą wytrzymałość na zginanie.

Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach działalności statutowej, nr w AGH 11.11.110.015.

LITERATURA

- [1] Szczepanik S., Gradient materials on aluminum alloy basis obtained from powders by hot forming, *Inżynieria Materiałowa* 2007, XXVIII, 2-3, 602-605.

- [2] Kieback B., Meyer-Olbersleben F., Bauteile mit konträren Eigenschaften aus Gradientenwerkstoffen herstellbar, *Maschinenmarkt* 1999, 105, 38.
- [3] Polowski W., Szczepanik S., Próby nagniatania kompozytów metalowych wykonanych na osnowie proszku aluminium i jego stopów, *Materiały II Konferencji Szkoły Obróbki Skrawaniem: Obróbka skrawaniem: innowacje*, pod red. J. Stósa, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 2008, 385-393.
- [4] Szczepanik S., Wojtaszek M., Struktura i wybrane własności kompozytów warstwowych ze stopów Fe-Al otrzymanych metodą metalurgii proszków po zagęszczaniu w matrycy zamkniętej, *Kompozyty (Composites)* 2008, 8, 4, 317-321.
- [5] Program LARSTRAN SHAPE. acut Aachener Umformtechnik GmbH, Aachen, Niemcy.
- [6] Szczepanik S., Modelling of forming processes of two-component Al-Al alloy composites, *Kompozyty (Composites)* 2009, 9, 1, 24-28.