

Ustalenie własności drutu aluminiowego do zgrzewania ultradźwiękowego

WSTĘP

Coraz częściej w technice półprzewodnikowej łączenie bazy, emitera z wyprowadzami wykonuje się metodami zgrzewania ultradźwiękowego. Metoda ta posiada szereg zalet takich jak niska temperatura tworzenia się złącza, zachowanie wyjściowych własności łączonych materiałów, mała rezystancja połączenia, możliwość łączenia materiałów różniących się grubością, które predysponują ją do stosowania w technologii półprzewodnikowej. Łączenie przy pomocy zgrzewania ultradźwiękowego stosuje się między innymi przy montażu tranzystorów BD 254 i BD 253. Bazę i emiter tych tranzystorów łączy się z wyprowadzeniami drutem aluminiowym o średnicy 100 μm . W czasie montażu okazało się, że dla niektórych partii drutu aluminiowego nie można uzyskać połączenia - rys. 1. Wstępna analiza sugerowała, że powodem tego są nieodpowiednie własności stosowanego drutu. W chwili obecnej nie ma normy ani warunków technicznych, które podawałyby wymagania dotyczące własności drutu aluminiowego do zgrzewania ultradźwiękowego. Trudności, które zaistniały przy montażu wykazały konieczność ich określenia, co zapewni łatwe i poprawne zgrzewanie na powszechnie stosowanych urządzeniach.

Celem pracy było określenie podstawowych własności drutu aluminiowego odpowiedzialnych za jakość połączenia oraz ustalenie przyczyn powstawania złych połączeń.

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PROCES ZGRZEWANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO

Zgrzewanie ultradźwiękowe polega na wywołaniu naprężeń ściskających pomiędzy elementami łączonymi z jednoczesnym doprowadzeniem drgań ultradźwiękowych. Drgania ultradźwiękowe przy istnieniu naprężeń ściskających wywołują tarcie pomiędzy powierzchniami łączonymi, dzięki któremu usuwa się warstwy utlenione oraz wytworzone zostaje ciepło. Przez odpowiedni wzrost temperatury uzyskuje się odkształcenie plastyczne przy istniejącym stanie naprężenia. Wzrasta przy tym również energia atomów powierzchniowych, co razem z odkształceniem plastycznym powoduje powstawanie wspólnych kryształów na granicy łączonych elementów bez stąpienia metali.

Dla otrzymania połączenia ultradźwiękowego o najwyższej wytrzymałości należy odpowiednio dobrać:

1. nacisk wywołujący naprężenie ściskające,
2. częstotliwość drgań ultradźwiękowych,
3. amplitudę drgań,
4. czas zgrzewania.

W praktyce parametrami, które się zmienia są amplituda drgań i siła nacisku. Parametry te są w ścisłym związku z własnościami mechanicznymi materiału łączącego, które zależne są od struktury oraz stanu powierzchni drutu. Im wyższa granica plastyczności i gorszy stan powierzchni tym większą należy stosować siłę nacisku i amplitudę drgań. Granicznymi wielkościami tych parametrów jest wytrzymałość doraźna drutu, lub, co często się zdarza, wytrzymałość zmęczeniowa. Wynika stąd konieczność poznania tych cech fizycznych materiału, które są potrzebne do ustalenia wymagań własności drutu aluminiowego do połączeń metodą zgrzewania ultradźwiękowego.

BADANIA WŁASNE

Badania przeprowadzono na drutach aluminiowych o średnicy $d = 100 \mu\text{m}$, z których jeden wykazywał zadowalającą własność przy zgrzewaniu ultradźwiękowym a drugi nie pozwalał na uzyskanie połączeń zarówno z bazą i emiterym jak i przepustami. Pierwszy drut oznaczono literą A a drugi literą B.

Skład chemiczny badanych drutów

Tablica 1

Materiał	Skład chemiczny								
	Cu	Ca	Pb	Mg	Mn	Fe	Cd	Na	Si ^{1/}
A	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$< 1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$< 1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
B	$5 \cdot 10^{-4}$	$< 1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$< 1,0 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

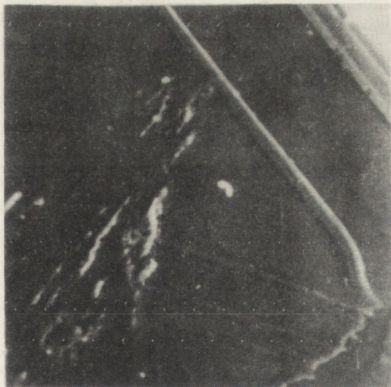
1/ Wyniki analizy ilościowej

Z oznaczenia składu chemicznego drutów A i B/ tablica 1/ wynika, że czystość ich jest lepsza niż 4N. Drut B zawierał procentową większą ilość zanieczyszczeń miedzią i żelazem, natomiast krzemu i sodu było w nim mniej niż w drucie A.

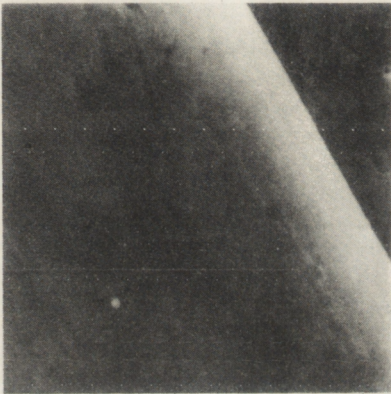
Ocenę stanu powierzchni drutu przeprowadzono na mikroskopie skaningowym. Obserwacje powierzchni wykonano na odcinkach drutu o długości około 5 m. Ujawniły one, że drut A ma powierzchnię gładką; pęknięcia i wżery spotykano bardzo rzadko /rys. 2 i 3/.

Powierzchnia drutu B na całej obserwowanej długości miała charakterystyczną siatkę pęknięć/rys. 4 i 5/. Oprócz tego na powierzchni bardzo często występowały wżery i głębokie pęknięcia.

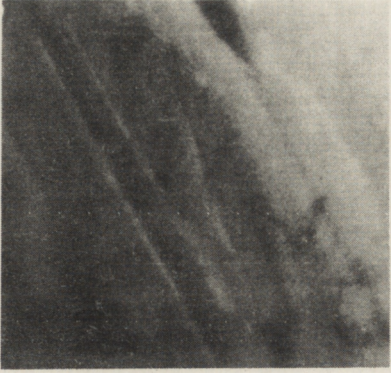
W czasie wykonywania połączenia drut jest wyciągany przez oczko sonotrody, zgięty i następnie dociśnięty z odpowiednią siłą do elementu łączzonego. Pęknięcia jakie mogłyby powstać w czasie zginania niekorzystnie mogłyby wpływać na wytrzymałość złącza, a nawet stanowić ogniska pęknięć zmęczeniowych. Dlatego przeprowadzono oględziny powierzchni drutów A i B w miejscu ich zgięcia pod kątem prostym.



Rys. 1. Ślady próby połączenia
druku aluminiowego ze strukturą
półprzewodnikową



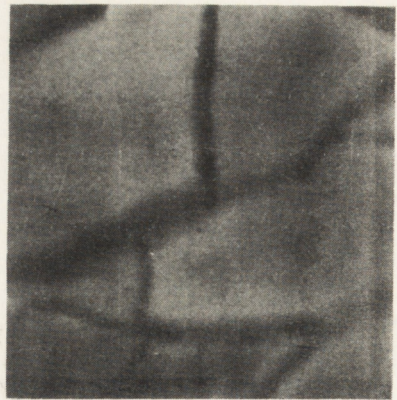
Rys. 2. Powierzchnia drutu A



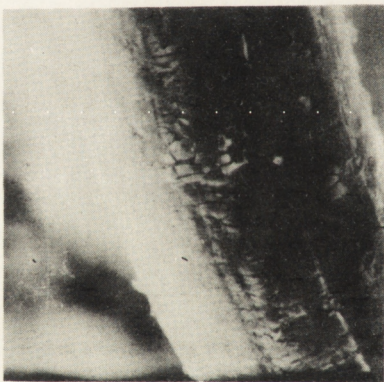
Rys. 3. Powierzchnia drutu A
w dużym powiększeniu



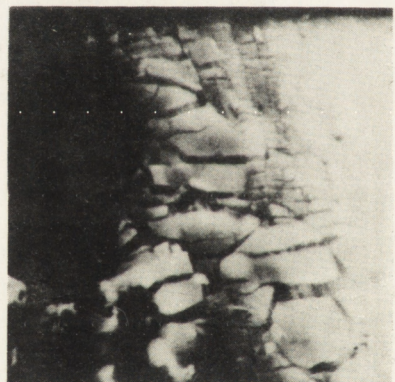
Rys. 4. Powierzchnia drutu B



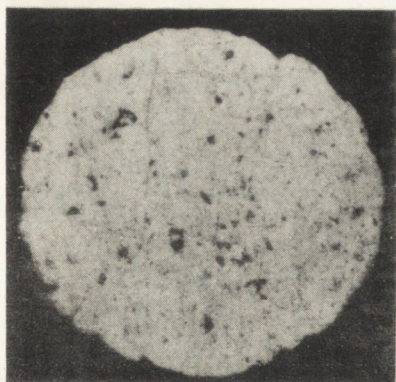
Rys. 5. Siatka pęknięć na powierzchni drutu B



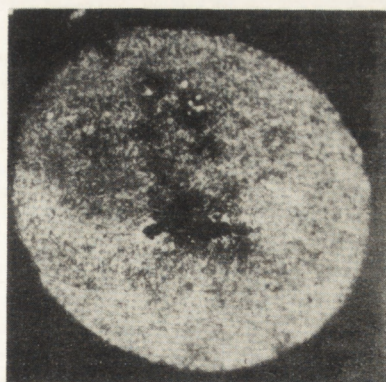
Rys. 6. Widok pęknięć powstałych na skutek zgięcia drutu B



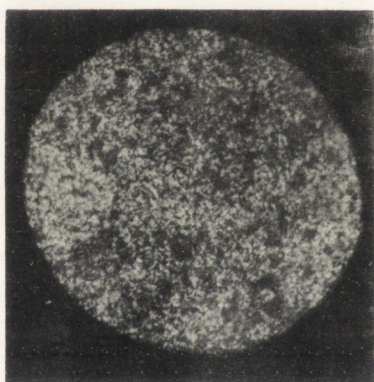
Rys. 7. Charakterystyczne pęknięcia w miejscu zgięcia drutu B



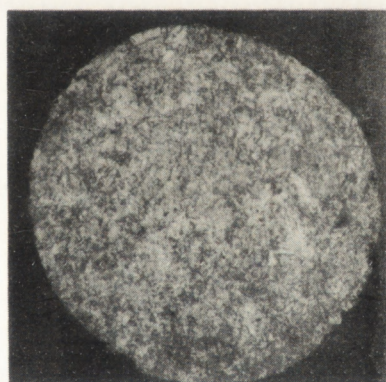
Rys. 8. Wydzielenia na przekroju drutu B



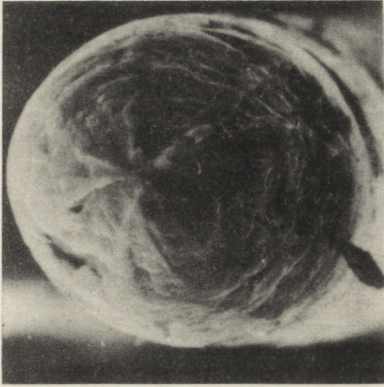
Rys. 9. Duże wydzielenie SiO₂ na przekroju drutu B



Rys.10. Struktura drutu A



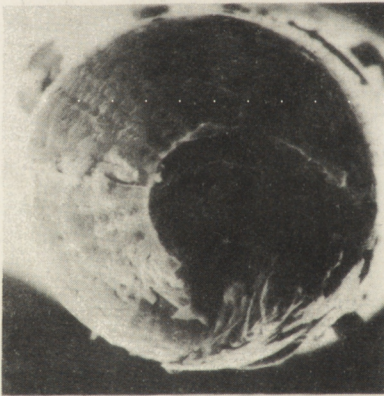
Rys.11. Struktura drutu B



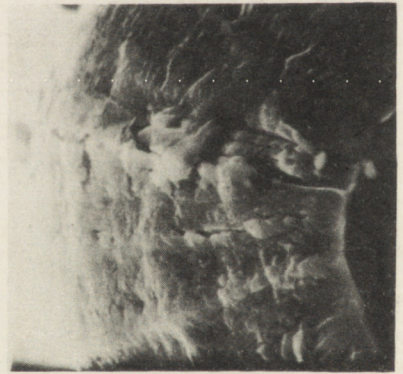
Rys. 14. Przełom drutu A w miejscu zerwania w próbie rozciągania



Rys. 15. Fragment przełomu drutu A z widocznymi "stopniami" odkształceń plastycznych



Rys. 16. Przełom drutu B w miejscu zerwania w próbie rozciągania



Rys. 17. Fragment przełomu drutu B. Widoczne pęknięcia przebiegające w kierunku promienistym

Oględziny ujawniły powstawanie pęknięć na drucie B /rys. 6 i 7/. Natomiast drut A nie wykazywał istotnych zmian stanu powierzchni.

Badania struktury przeprowadzono jedynie na mikroskopie świetlnym. Druty zatopiono w żywicy i następnie polerowano mechanicznie. Tak przygotowane szlify poddano obserwacji na mikroskopie celem wykrycia istniejących ewentualnie wtrąceń. Na szlifie z drutu A wydzielenia były o małej średnicy i obserwowano je rzadko, co uniemożliwiło ich identyfikację za pomocą mikrosondy.

Na szlifie z drutu B ilość wydzielań była duża a wielkość ich dochodziła czasami do wymiaru 1/4 średnicy drutu /rys. 8 i 9/. Zidentyfikowano je za pomocą mikrosondy jako SiO₂. Po zakończeniu obserwacji wtrąceń szlify trawiono. Zdjęcia struktury drutu A pokazano na rys. 10, a drutu B na rys. 11. Struktura badanych drutów jest podobna z tym, że wielkość ziarna w strukturze drutu B jest większa.

Badania mechaniczne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron przy zakresie obciążeń do 100 G. Prędkość rozciągania wynosiła 0,6 mm/min. Wydłużenie odczytywano z wykresu rozciągania wobec niemożliwości zamocowania ekstensometru na drucie. Otrzymane wyniki badań zestawiono w tabelicy 2.

Wyniki badań wytrzymałościowych

Tabela 2

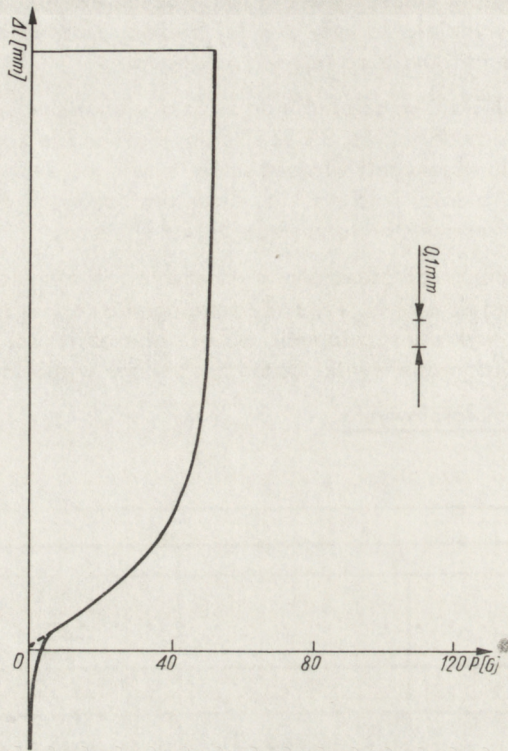
Lp.	Drut			
	A		B	
	R_m $\frac{kG}{mm^2}$	Δl ^{1/} mm	R_m $\frac{kG}{mm^2}$	Δl ^{1/} mm
1	6,7	1,52	7,6	0,08
2	6,7	2,44	6,5	0,03
3	6,7	2,38	8,0	0,15
4	6,8	2,54	9,4	0,23
5	6,8	1,85	11,0	1,00
6			10,7	0,80
średnio	6,7	2,15	8,9	0,38

1/ Wydłużenie mierzono z wykresu przy długości rozciąganego drutu między szczękami $l = 150$ mm

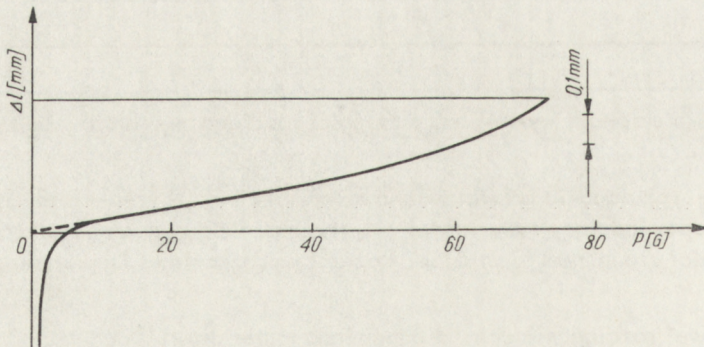
Typowe krzywe rozciągania przedstawiono na rys. 12 i 13. Krzywa rozciągania drutu A ma kształt odpowiadający materiałowi ciągliwemu. Pole pod krzywą, które jest miarą ciągliwości /toughness/, jest duże. Rozrzut wytrzymałości R_m i wydłużenia Δl jest niewielki.

Kształt krzywej rozciągania drutu B odpowiada materiałowi kruchemu. Pole pod krzywą rozciągania jest znacznie mniejsze niż w przypadku drutu A. Rozrzut wytrzymałości R_m i wydłużenia jest duży /dochodzi do 40% wartości przeciętnej R_m /. Precyzyjne wyznaczenie granicy plastyczności było niemożliwe do wykonania

ze względu na brak bazy odniesienia dla wydłużenia uzyskanego na wykresie. Porównując krzywe rozciągania drutów A i B wykonane w tych samych warunkach i przy tych samych parametrach próby rozciągania widać, że granica plastyczności drutu A jest znacznie niższa od odpowiadającej wartości drutu B, rys./12 i 13/.



Rys. 12. Wykres rozciągania drutu A w układzie siła-wydłużenie



Rys. 13. Wykres rozciągania drutu B w układzie siła-wydłużenie

Badania przełomów drutów zerwanych w próbie rozciągania przeprowadzone na mikroskopie skaningowym potwierdzają wyniki badań wytrzymałościowych. Zgodnie z oczekiwaniami, przełom drutu A jest typu ciągliwego/rys. 14 i 15/, natomiast drutu B - jest płaski bez widocznych odkształceń plastycznych, z zauważalnymi pęknięciami biegnącymi w kierunku promieniowym, rys. 16 i 17/.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Przeprowadzone badania ujawniły istotne różnice pomiędzy badanymi drutami, szczególnie wyraźnie dotyczą one stanu powierzchni i własności mechanicznych. Drut B w porównaniu z drutem A charakteryzował się powierzchnią popękaną z licznymi wżerami. Popękana warstwa powierzchniowa była bardzo twarda, co obserwowano w próbie zginania. W związku z tym należy przypuszczać, że jest ona trudna do usunięcia w procesie zgrzewania bez wykonania dodatkowych zabiegów.

Struktura drutu B charakteryzowała się dużą ilością wtrąceń o bardzo zróżnicowanych wielkościach. Ziarna różniły się znacznie wielkością, przeciętnie były jednak większe niż spotykane w drucie A. Prawdopodobnie wtrącenia i zróżnicowanie wielkości ziaren powodowały duży rozrzut wytrzymałości i wydłużenia.

Z porównania wyników prób rozciągania drutów A i B widać, że wytrzymałość drutu B jest wyższa od drutu A o 30%, przeciętne wydłużenie natomiast jest sześciokrotnie niższe. Wyższa wytrzymałość drutu B jest prawdopodobnie wynikiem umocnienia dyspersyjnego oraz wyższej gęstości dyslokacji. Większa wielkość ziarna w drucie B sugeruje, z zależności Halla-Petcha

$$R_e = K_0 + K_1 \cdot d^{\frac{1}{2}}$$

gdzie K_0 i K_1 - stałe materiału
 d - średnica ziarna,

że granica plastyczności powinna być niższa niż dla drutu A.

Prawdopodobnie w przypadku badanym przeszkodami w ruchu poślizgowym dyslokacji nie są granice ziarn a wydzielenia wewnątrz ziarn, które znacznie zmniejszają drogę swobodnego poślizgu. Wyniki badań mechanicznych dobrze korelują z badaniami przełomów drutów zerwanych w próbie rozciągania. Przełomy drutu B zgodnie z przypuszczeniami odpowiadają materiałowi o niskiej ciągliwości, są one płaskie bez widocznych odkształceń plastycznych. Przełomy drutu A mają powierzchnie zbliżone kształtem do stożka i wyraźnie zaznaczonymi stopniami odkształceń plastycznych; odpowiadają one materiałowi o zadowalającej ciągliwości.

Za otrzymane różnice we własnościach drutów A i B nie można czynić odpowiedzialnymi różnic w składzie chemicznym. Wydaje się, że zły stan powierzchni drutu B, niska ciągliwość i wysoka wytrzymałość są spowodowane niewłaściwą przeróbką plastyczną.

PRZYCZYNY ZŁEGO ZGRZEWANIA

Z przedstawionego opisu metody zgrzewania ultradźwiękowego wynika, że zasadniczymi elementami wpływającymi na możliwość uzyskania połączenia są stan powierzchni oraz plastyczność drutu. Przy zastosowaniu drutu B do zgrzewania, na 30 prób połączenia tylko 9 dało wynik pozytywny. Dla szacunkowej oceny wpływu stanu powierzchni na ilość braków, popękaną twardą warstwę powierzchniową usunięto przez trawienie. Ilość braków spadła z 70% do 35%. Wynika z tego dodatkowo, że tarcie występujące między elementami zgrzewanymi nie było w stanie zedrzyć warstwy powierzchniowej. Zwiększenie mocy zgrzewania dla zwiększenia sił tarcia prowadziło do pęknięcia drutu.

Pozostały procent braków należy przypisać słabej plastyczności drutu. Wy tłumaczyć można to w następujący sposób. Dla uzyskania wzajemnego przenikania się powierzchni styków elementów łączonych dla utworzenia trwałej zgrzeiny, wskutek wyższej granicy plastyczności, należy zwiększyć siłę nacisku. Zwiększając siłę nacisku zwiększamy naprężenie w drucie. Przy stosowaniu tej samej amplitudy drgań zwiększają się naprężenia przemienne. Wytrzymałość drutu musi być w tym przypadku liczona zgodnie z zasadami określonymi w procesie zmęczenia. Liczba cykli zmian naprężeń w czasie zgrzewania, jakiej poddany zostaje drut jest znaczna, wynosi bowiem 100 - 150 tys. cykli. Wyższe naprężenia i wady powierzchniowe drutu istniejące lub które powstają przy zginaniu drutu wychodzącego z sonotrody, mogą powodować utratę jego spójności na skutek zmęczenia.

WYMAGANE WŁASNOŚCI DRUTU ALUMINIOWEGO DO ZGRZEWANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO

Z omówienia wyników badań oraz sugestii przyczyn złych połączeń wynika, że uzyskanie trwałego połączenia metodami zgrzewania ultradźwiękowego drutu aluminiowego o średnicy 100 μm z bazą, emiterem i wyprowadzeniami odpowiedzialne są: stan powierzchni drutu i jego własności mechaniczne. Dla zagwarantowania złącza o wysokiej wytrzymałości drut aluminiowy powinien spełniać następujące wymagania:

1. czystość drutu lepsza od 4N,
2. wytrzymałość $R_m \leq 7 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$,
3. wydłużenie mierzone na długości 150 mm $\Delta l \geq 1,5 \text{ mm}$,
4. powierzchnia drutu powinna być gładka i bez wżerów przy obserwacji pod powiększeniem 600 razy.

Przy ustaleniu podanych warunków wykorzystano przede wszystkim wyniki otrzymane dla drutu A, dla którego ilość braków była niższa od 1%.

Podziękowanie

Autor składa podziękowanie mgr M. Pawłowskiej za umożliwienie obserwacji i wykonanie zdjęć na mikroskopie skaningowym oraz E. Cabanowskiej za pomoc w badaniach metalograficznych.