

dr inż. Henryk Woźniak<sup>1)</sup>, dr inż. Jacek Borowski<sup>2)</sup>, dr inż. Karol Józwiak<sup>1)</sup>,  
dr inż. Jarosław Samolczyk<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Poznań, <sup>2)</sup> Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

## WPŁYW TEMPERATURY NA WYTRZYMAŁOŚĆ DOCZOŁOWEGO ZŁĄCZA Al-Cu UZYSKANEGO METODĄ OBRÓBKI PLASTYCZNEJ NA ZIMNO

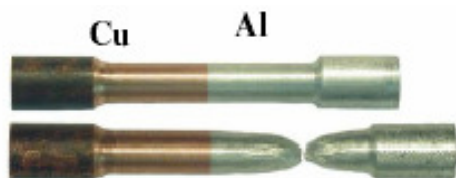
### Streszczenie

Opisano wyniki badań wpływu temperatury na wytrzymałość złączy aluminium-miedź (Al-Cu) wykonanych technologią obróbki plastycznej na zimno. Odcinki prętów spajano metodą spęczania ich końców. Próbkę wyżarzano w temperaturze 300, 400, 530, 540 i 570°C, stosując różny czas wygrzewania i różne sposoby chłodzenia. Badania strukturalne wykazały, że począwszy od temperatury 400°C w złączu powstaje strefa twardych i kruchych związków międzymetalicznych CuAl, CuAl<sub>2</sub>, CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>, układających się w przylegające do siebie warstwy o łącznej grubości od 30 do 100 µm. Wszystkie złącza zawierające związki międzymetaliczne pękały w próbie gięcia przy sile kilkakrotnie mniejszej od siły potrzebnej do wygięcia danej próbki w stanie niewyżarzonym. Stwierdzono, że wartość siły pęknięcia jest tym mniejsza im wyższa była temperatura nagrzania złącza.

**Słowa kluczowe:** obróbka plastyczna, spajanie na zimno, jakość spoin, miedź, aluminium, końcówki kabli energetycznych

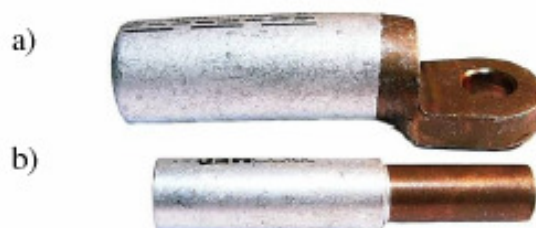
### 1. Wstęp

Złącza doczołowe Al-Cu wykonane metodą obróbki plastycznej na zimno poprzez spęczanie końców spajanych prętów, wykazują w próbach rozciągania wytrzymałość większą od wytrzymałości materiałów wyjściowych [1-4] – rys. 1. Większa wytrzymałość złącza spowodowana jest umocnieniem odkształceniowym tych materiałów w złączu.



Rys. 1. Próbkę złącza Al-Cu przed i po próbie rozciągania

Wyroby z takim złączem mogą być poddane przypadkowemu działaniu podwyższonej temperatury np. złącza kablowe – rys. 2.



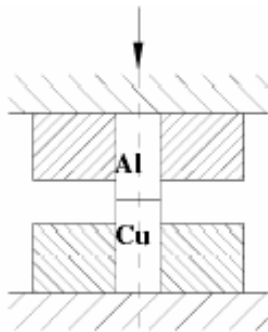
Rys. 2. Przykłady końcówki kablowej: a) rurowej, b) łącznika

W celu zaobserwowania skutków wpływu temperatury, czasu wygrzewania i sposobu chłodzenia na wytrzymałość złącza Al-Cu, przeprowadzono badania opisane w niniejszym artykule.

Planuje się dalsze badania wytrzymałości złącza Al-Cu dla poszerzonych przedziałów zmienności parametrów procesu wyżarzania i spajania na zimno.

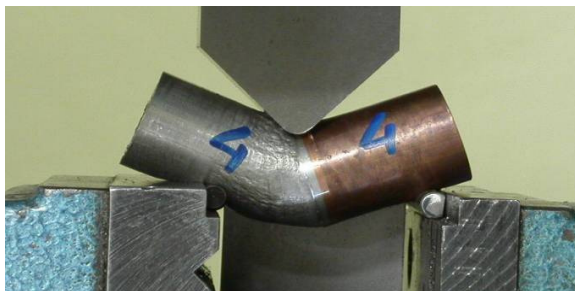
## 2. Metodyka badań

Złącza Al-Cu uzyskano przez spojenie odcinków prętów o średnicy  $\phi$  23 mm z aluminium A1 o twardości 23 HB i z miedzi M1E o twardości 82 HB, w sposób pokazany schematycznie na rys. 3. Wytrzymałość złącza oceniano w próbie gięcia. Jest to prosta i szybka próba dająca w ocenie lokalizacji utraty spójności próbki w złączu Al-Cu lub poza nim, podobny wynik jak próba rozciągania.



Rys. 3. Schemat spęczania w procesie łączenia próbek Al-Cu [2]

W celu wyeliminowania z dalszych badań próbek wadliwie spojonych, próbki poddano wstępnej próbie gięcia na maszynie wytrzymałościowej INSTRON – rys. 4. Droga stempla wynosiła  $s = 12$  mm przy odległości podpór 45 mm.



Rys. 4. Przykład wstępnej próby gięcia ( $s = 12$  mm) na maszynie INSTRON

Próbki, wstępnie zginane, wyżarzono i ponownie poddano próbie gięcia. Parametry wyżarzania i wyniki próby gięcia zestawiono w tabeli 1. Do badań strukturalnych wykorzystano powierzchnie przełomów oraz zglądy metalograficzne wycięte prostopadle do powierzchni przełomu.

Wstępne obserwacje zglądów metalograficznych trawionych i nietrawionych przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego NIKON ECLIPSE L150 w świetle spolaryzowanym.

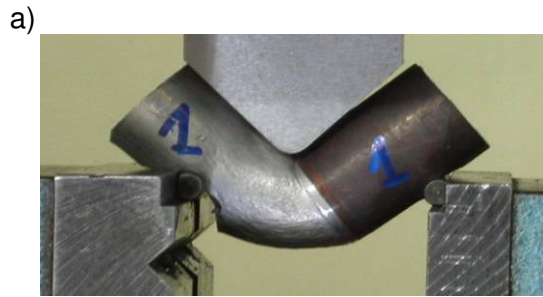
Identyfikację mikrostruktury złącza Al-Cu, w szczególności związków międzymetalicznych, wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego Tescan Vega 5135 z detektorem mikroanalizy EDS PGT Prism 2000. Dyfrakcję rentgenowską wykonano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego Kristalloflex-4 firmy Siemens. Zastosowano promieniowanie  $\text{MoK}\alpha$ . Do identyfikacji faz posłużono się tablicami ASTM (American Society for Testing Materials). Pomiary mikrotwardości HV0,005 przeprowadzono na zglądach za pomocą twardościomierza MICROMET 2104 firmy Buehler.

## 3. Wyniki badań

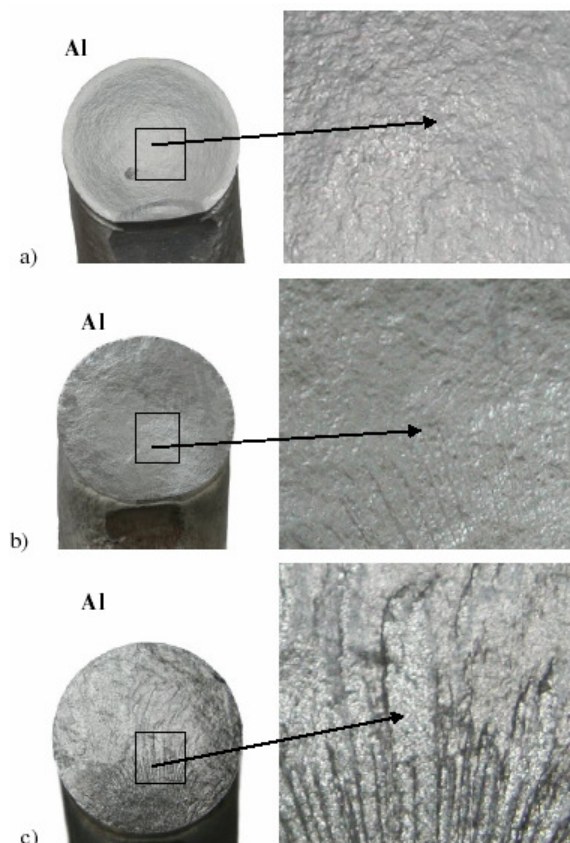
Tablica 1  
Parametry wyżarzania próbek Al-Cu i wyniki próby gięcia [2]

Nr próby	Parametry wyżarzania temperatura / czas wygrzewania/ sposób chłodzenia	Wyniki próby gięcia
Próba nr 1	300 °C / 1h / woda	brak pęknięć - rys. 5a siła gięcia $P = 36 \pm 0,5$ kN
Próba nr 2	300 °C / 10h / z piecem	brak pęknięć - rys. 5a siła gięcia $P = 36 \pm 0,5$ kN
Próba nr 3	400 °C / 1h / woda	pękanie w złączu, przy sile gięcia $P = 26,5 \pm 0,5$ kN, – rys. 5b
Próba nr 4	530 °C / 1h / woda	pękanie w złączu, przy sile gięcia $P = 11 \pm 0,8$ kN, – rys. 5b
Próba nr 5	530 °C / 2h / z piecem	pękanie w złączu, przy sile gięcia $P = 7,3 \pm 0,7$ kN – rys. 5b

Na podstawie obserwacji makroskopowych obrazów powierzchni przełomu próbek oraz analizy wartości sił gięcia, podanych w tabeli 1, stwierdzono, że struktura powierzchni przełomu próbek (rys. 6) i wartość siły pęknięcia, zależy od warunków wyżarzania.



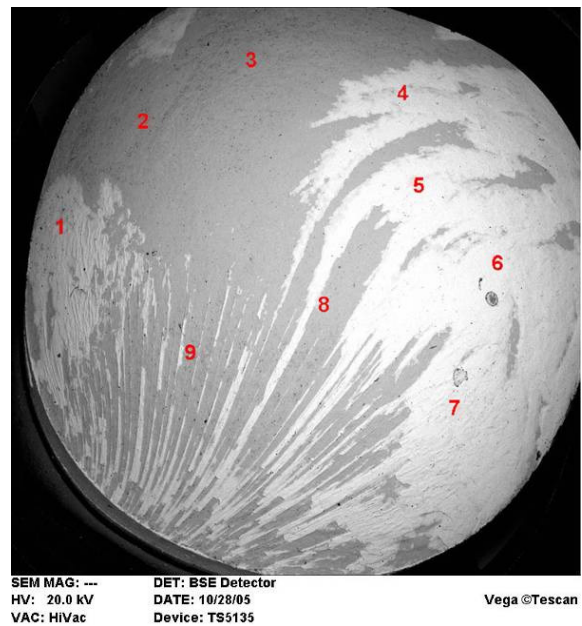
Rys. 5. Przykłady końcowego etapu gięcia próbek wyżarzonych: a) brak pęknięć, b) pęknięcie w złączu



Rys. 6. Przykłady makroskopowych obrazów powierzchni przełomu próbek wyżarzonych: a) próba nr 3 (400°C/1h/woda), b) próba nr 4 (530°C/1h/woda), c) próba nr 5 (530°C/2h/z piecem)

### 3.1 Badania strukturalne złącza Al-Cu pękniętego w próbie gięcia

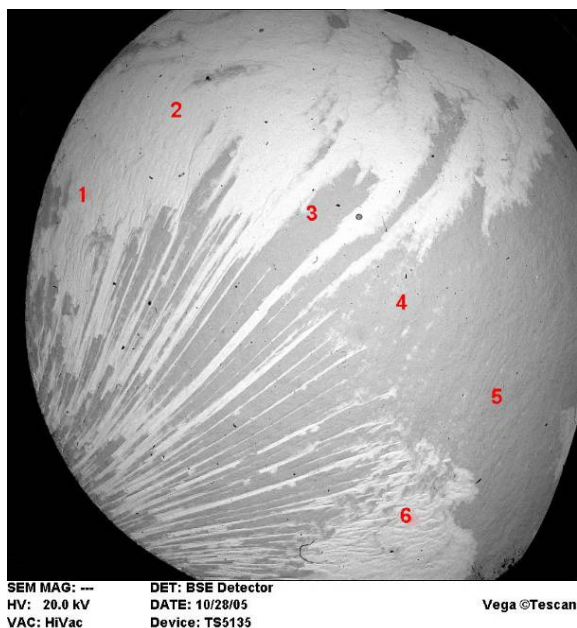
Badania strukturalne złącza Al-Cu, pękniętego w próbie gięcia wykonano na próbkach wyżarzonych w warunkach 530 °C/2h/powietrze przed próbą gięcia. Wykonano mikroanalizę składu chemicznego na obu powierzchniach przełomu tzn. po stronie Al i po stronie Cu, w miejscach oznaczonych na rys. 7 i 8.



Miejsce nr	1	2	3	4	5
Zaw. Al. %	24,3	49,8	52,0	23,6	24,9
Zaw. Cu %	75,7	50,2	48,0	76,4	75,1

Miejsce nr	6	7	8	9
Zaw. Al. %	23,0	20,5	46,7	49,8
Zaw. Cu %	77,0	79,5	53,3	50,2

Rys. 7. Wyniki mikroanalizy powierzchni przełomu po stronie Al



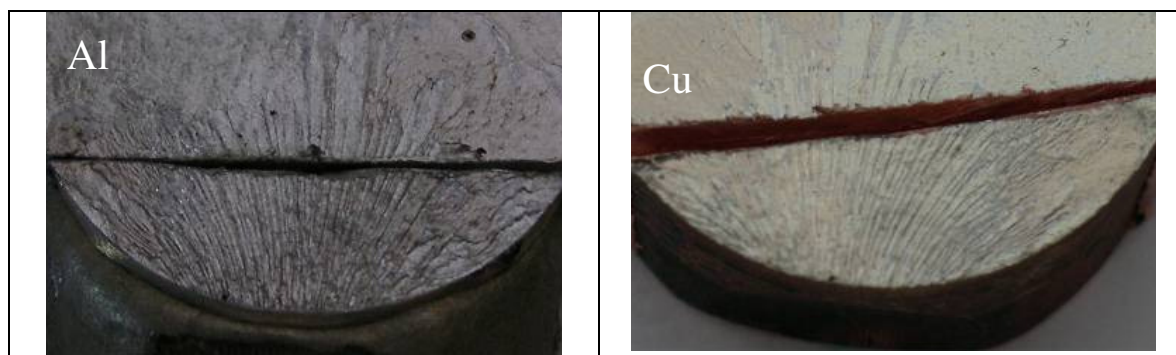
Miejsce nr	1	2	3	4	5
Zaw. Al. %	21,7	23,3	47,2	42,6	48,7
Zaw. Cu %	78,3	76,7	52,8	57,4	51,3

Rys. 8. Wyniki mikroanalizy powierzchni przełomu po stronie Cu

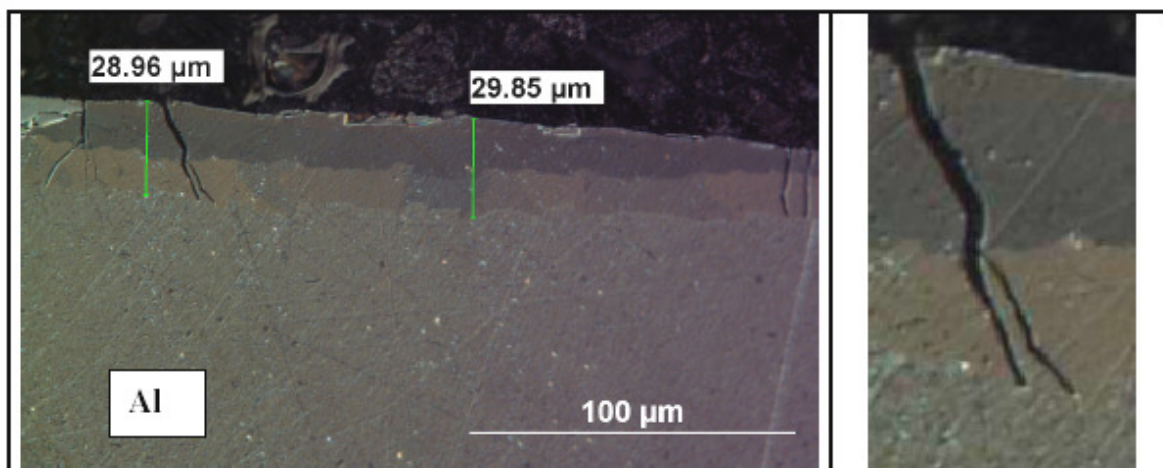
Na podstawie wyników mikroanalizy (rys. 7 i 8) można stwierdzić, że na powierzchni przełomów znajdują się związki międzymetaliczne o różnej stechiometrii.

Dalsze badania przeprowadzono na zglądach wykonanych z próbek wyciętych prostopadle do powierzchni przełomu (rys. 9). Grubość warstwy związków międzymetalicznych, mierzona od podłoża do powierzchni przełomu wynosiła: po stronie Al - ok. 30  $\mu\text{m}$ , po stronie Cu - ok. 50  $\mu\text{m}$  (rys. 10, 11). W przypadku próbki Al, widoczne są pęknięcia warstwy związków międzymetalicznych, biegnące od powierzchni przełomu do podłoża i tam kończące się bez wyraźnej szczeliny.

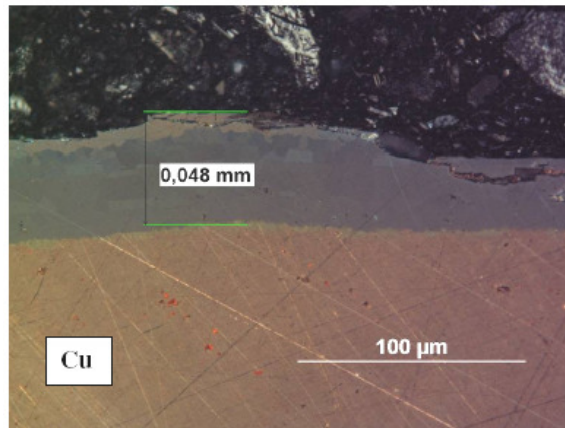
Mikroanaliza składu chemicznego, wykonana na powierzchni zglądów wykazała znaczną różnicę pomiędzy składem chemicznym podłoża i warstwy związków międzymetalicznych – rys. 12 i 13.



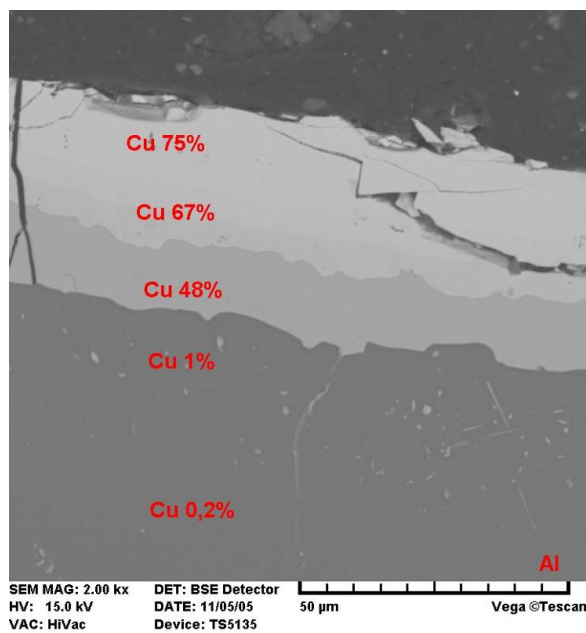
Rys. 9. Sposób wycięcia próbek do zglądów metalograficznych



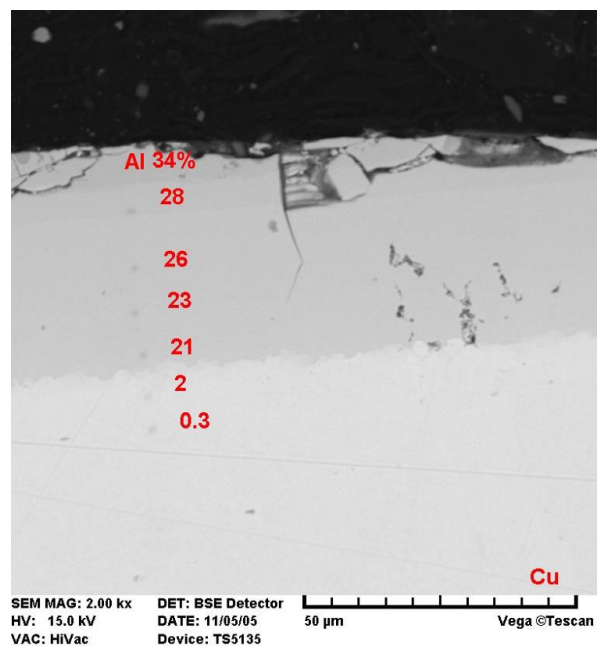
Rys. 10. Struktura warstwy przypowierzchniowej po stronie Al; widoczne warstwy różnych związków międzymetalicznych oraz ich pęknięcia; zgląd nietrawiony, mikroskop świetlny, obraz w świetle spolaryzowanym



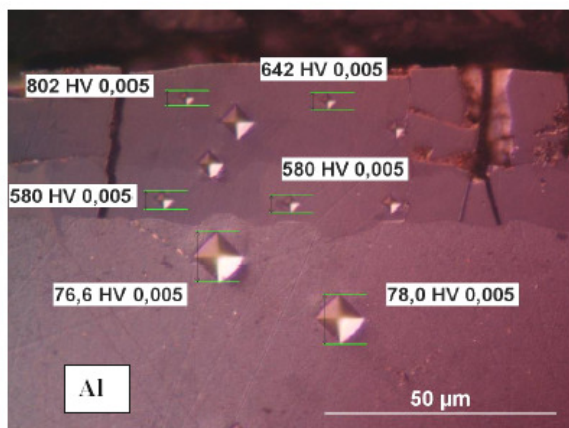
Rys. 11. Struktura warstwy przypowierzchniowej po stronie Cu; widoczne warstwy różnych związków międzymetalicznych; zgląd nietrawiony, mikroskop świetlny, obraz w świetle spolaryzowanym



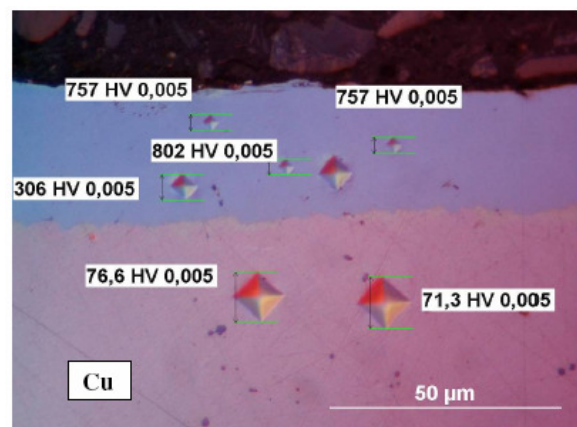
Rys. 12. Przykład rozkładu zawartości Cu w Al w warstwie przypowierzchniowej przełomu, po stronie Al



Rys. 13. Przykład rozkładu zawartości Al w Cu w warstwie przypowierzchniowej przełomu, po stronie Cu



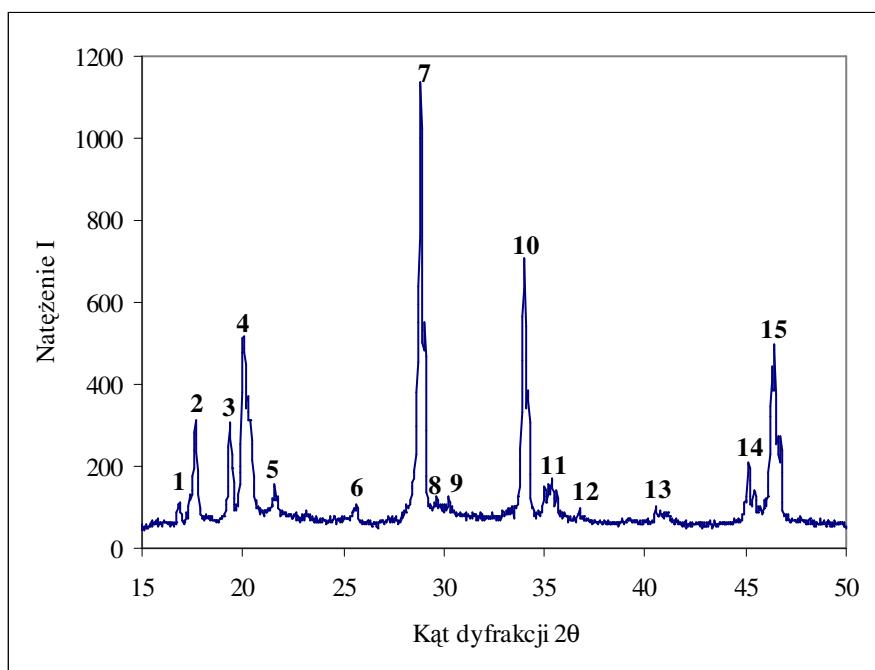
Rys. 14. Wyniki pomiarów mikrotwardości HV/0.005 na zglądzie Al



Rys. 15. Wyniki pomiarów mikrotwardości HV/0.005 na zglądzie Cu

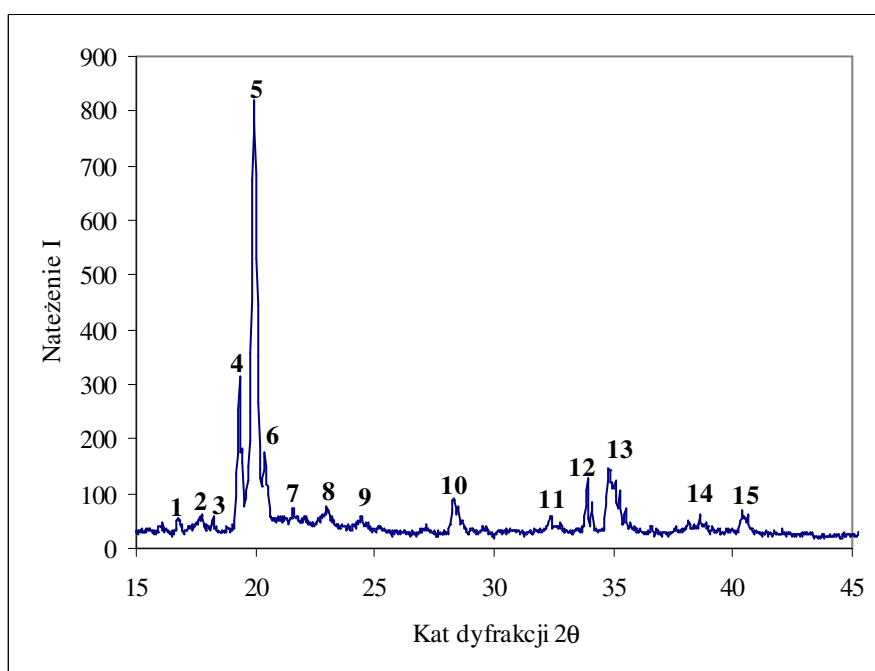
W celu zidentyfikowania związków międzymetalicznych, powstałych w złączu Al-Cu podczas wyżarzania, przeprowadzono rentgenowską analizę fazową powierzchni przelomu próbek Al i Cu pokazanych na rys. 7 i 8. Otrzymane rentgenogramy przedstawiono na rys. 16 i 17.

Na podstawie otrzymanych rentgenogramów określono odległości międzypłaszczyznowe dla każdej linii dyfrakcyjnej. Po określeniu odległości międzypłaszczyznowych każdej linii dyfrakcyjnej, zweryfikowano ich zgodność z danymi wzorcowymi. Jak wynika z analizy fazowej, po stronie Al utworzyły się związki CuAl i CuAl<sub>2</sub>, natomiast po stronie Cu głównie Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>.



L.p	Wynik identyfikacji
1	CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
2	CuAl <sub>2</sub>
3	CuAl <sub>2</sub>
4	CuAl
5	CuAl
6	CuAl
7	CuAl
8	CuAl <sub>2</sub>
9	CuAl <sub>2</sub>
10	CuAl <sub>2</sub>
11	Al
12	CuAl <sub>2</sub>
13	CuAl <sub>2</sub>
14	CuAl <sub>2</sub>
15	CuAl <sub>2</sub>

Rys. 16. Wynik analizy fazowej powierzchni przelomu próbki Al (patrz rys. 7)



L.p	Wynik identyfikacji
1	CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
2	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
3	CuAl
4	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
5	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
6	CuAl
7	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
8	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
9	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
10	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
11	CuAl
12	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
13	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
14	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
15	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>

Rys. 17. Wynik analizy fazowej powierzchni przelomu próbki Cu (patrz rys. 8)

### 3.2 Badania strukturalne złącza Al-Cu nie poddanego niszczącej próbie gięcia

Badania strukturalne złącza Al-Cu, nie poddanego niszczącej próbie gięcia przeprowadzono na zglądach wyciętych z próbki pokazanej na rys. 18.

Badania miały na celu wyznaczenie rozkładu twardości i składu chemicznego w spoinie i bliskim otoczeniu spoiny, dla trzech stanów złącza:

- 1 – złącze niewyżarzone,
- 2 – złącze wyżarzone w temperaturze nieco niższej od eutektycznej (547 °C); przyjęto temperaturę 540 °C,
- 3 – złącze wyżarzone w temperaturze wyższej od temperatury eutektycznej; przyjęto temperaturę 570 °C.



Rys. 18. Próbka Al-Cu użyta do badań strukturalnych złącza niepełniętego; próbka niewyżarzona przed próbą gięcia

Wyniki badań złącza niewyżarzonego wykazały, że :

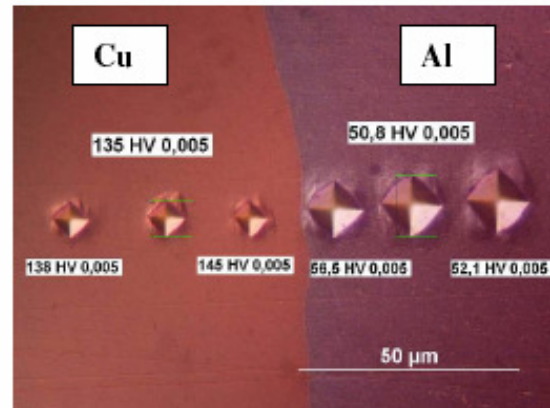
- na zglądzie nietrawionym, widoczna jest wyraźna granica pomiędzy obu spojonymi metalami, co potwierdzają wyniki pomiarów mikrotwardości HV<sub>0,005</sub> na zglądzie złącza Al-Cu - rys. 19,
- twardość HV, mierzona z obu stron w kierunku spoiny, wzrasta niewiele po stronie Al i Cu,
- strumień dyfuzji aluminium w miedzi jest wyraźnie większy niż miedzi w aluminium, o czym świadczą zawartości Al w Cu i Cu w Al po odpowiednich stronach spoiny - rys. 20, np. w odległości ok. 20 μm od spoiny, zawartość Al w Cu wynosi ok. 0,67%, a Cu w Al tylko ok. 0,34%.

Wyniki badań złączy wyżarzonych w temperaturach 540 °C i 570 °C wykazały:

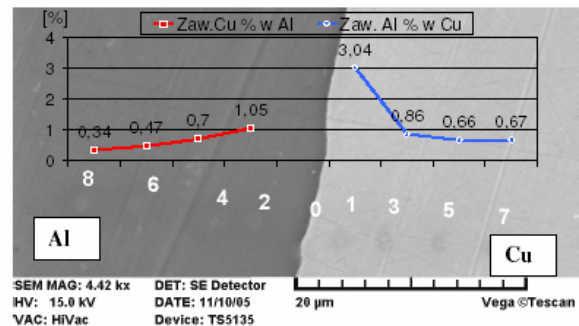
- obecność eutektyki Al-Cu po stronie Al - rys. 21, 22, 23,
- twardości i składy chemiczne w złączach wyżarzanych w temperaturze

540 °C i 570 °C są zbliżone do twardości i składów chemicznych w złączach wyżarzanych w temperaturze 530 °C, (opisanych w pkt. 3.1, rys. 14, 15 oraz rys. 7 i 8),

- złącze wyżarzone w temperaturze 570 °C uległo nadtopieniu po stronie Al, a granica pomiędzy Al i Cu, w postaci warstwy związków międzymetalicznych o wyraźnie falistym kształcie (rys. 22) migrowała w kierunku miedzi.



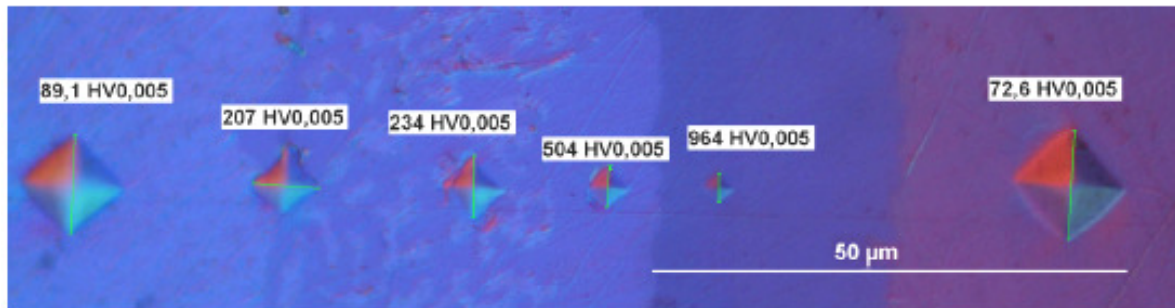
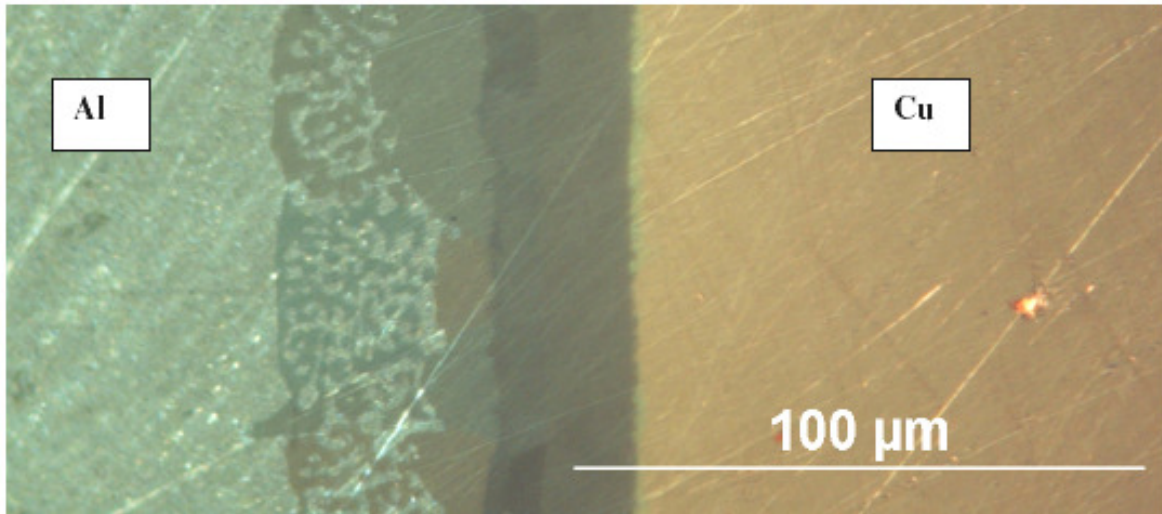
Rys. 19. Wyniki pomiarów mikrotwardości HV<sub>0,005</sub> na zglądzie złącza Al-Cu po plastycznym łączeniu na zimno (bez wyżarzania)



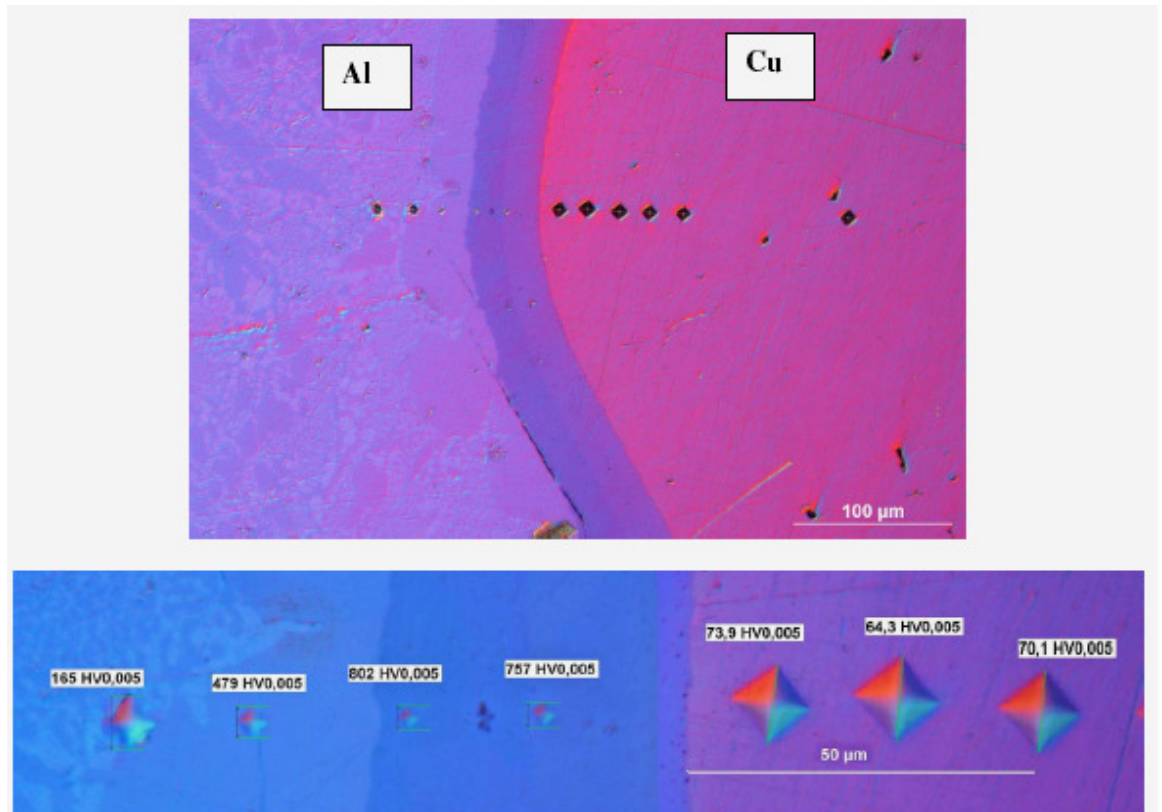
Miejsce nr	8	6	4	2	0
Zaw. Al %	99,22	99,22	99,02	98,49	52,98
Zaw. Cu %	0,34	0,47	0,70	1,05	46,53
Zaw. O %	0,44	0,30	0,28	0,46	0,49

Miejsce nr	1	3	5	7
Zaw. Al. %	3,04	0,86	0,66	0,67
Zaw. Cu %	96,51	98,25	98,73	98,89
Zaw. O %	0,45	0,89	0,61	0,44

Rys. 20. Wyniki punktowej bezwzorcowej mikroanalizy rentgenowskiej zglądu niewyżarzonego złącza Al-Cu; miejsca mikroanalizy (0-8) zaznaczono na obrazie SEM w kontraście topograficznym (SE)

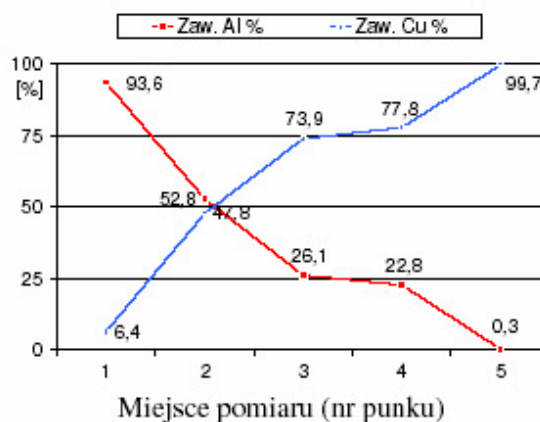
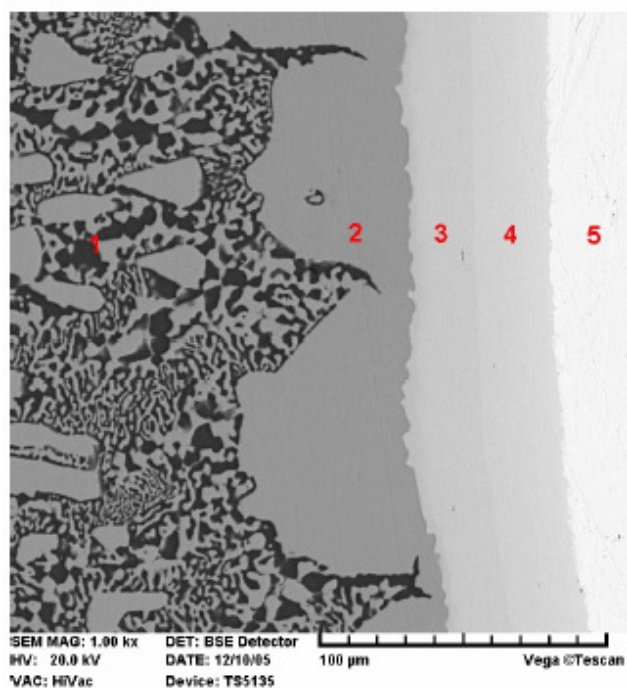


Rys. 21. Zgląd metalograficzny nietrawiony, z widocznymi w świetle spolaryzowanym warstwami kruchych i twardych związków międzymetalicznych oraz warstwą eutektyki; złącze Al-Cu wyżarzone 540 °C/2h/powietrze



Rys. 22. Zgląd metalograficzny nietrawiony, z widocznymi w świetle spolaryzowanym warstwami kruchych i twardych związków międzymetalicznych oraz eutektyką; złącze Al-Cu wyżarzone 570 °C/2h/powietrze





Rys. 23. Wyniki punktowej bezwzorcowej mikroanalizy rentgenowskiej, wykonanej za pomocą detektora EDS na złączu wyżarzonym złącza Al-Cu; miejsca mikroanalizy zaznaczono na obrazie SEM w kontraście chemicznym (BSE)

#### 4. Podsumowanie

Badania wykazały, że złącza aluminium z miedzią Al-Cu wykonane metodą obróbki plastycznej na zimno i wyżarzone w temperaturze do 300 °C nie pękały w próbach gięcia.

Natomiast pękały wszystkie złącza wyżarzone w wyższych temperaturach, począwszy od 400 °C. Im wyższa temperatura i dłuższy czas wyżarzania złącza tym mniejsza wytrzymałość złącza.

Złącza wyżarzane w temperaturze 570 °C ulegały wyraźnemu nadtopieniu po stronie aluminium.

Stwierdzono, że pękanie złączy Al-Cu było spowodowane obecnością w spoinie bardzo twardych i kruchych związków międzymetalicznych  $\text{CuAl}$ ,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ . Związki te powstały w wyniku reaktywnej dyfuzji aluminium i miedzi. Złącza wyżarzone w wysokiej temperaturze (powyżej 500 °C), wskutek intensywnych zjawisk dyfuzji, charakteryzowały się strukturą wyraźnie warstwową o małej wytrzymałości. Złącza takie pękały w próbie gięcia przy sile ok. 5-krotnie mniejszej od siły potrzebnej do wygięcia próbki nie wyżarzonej.

Twardość związków międzymetalicznych wynosiła od 300 do 960 HV0,005.

Zaobserwowano, że warstwa związków międzymetalicznych o grubości od 20 do 50 µm (w zależności od temperatury) migrowała w kierunku od aluminium do miedzi, nie zmieniając zasadniczo swej grubości. Prędkość migracji zależała od temperatury. Za migrującą warstwą związków międzymetalicznych (rozdzielającą Al i Cu) pozostały (po stronie aluminium) struktury o twardości powyżej 100 HV0,005..

Przewiduje się dalsze badania w celu minimalizacji niekorzystnych oddziaływań różnych czynników procesu spajania i podwyższonej temperatury na wytrzymałość złączy Al-Cu.

#### Literatura

1. Woźniak H.: Badania parametrów kształtowania plastycznego w procesach technologicznych, Odkształcenia plastyczne w czołowym łączeniu metali Al-Cu dla wyrobów używanych w energetyce. Badania własne, Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, 2003. (niepublikowane)

2. Woźniak H.: Badania parametrów kształtowania plastycznego w procesach technologicznych, Badania parametrów doczołowego spajania na zimno Al-Cu i ocena wytrzymałości spoin. Badania własne, Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, 2004. (niepublikowane)
3. Woźniak H.: Ocena jakości spoin Cu-Cu i Al-Cu wykonanych metodą spajania na zimno, Obróbka Plastyczna Metali, Nr 1, 2004, 5-9.
4. Woźniak H.: Zastosowanie metody doczołowego spajania na zimno Al-Cu w produkcji końcówek kabli energetycznych. Materiały II Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej Manufacturing '04, Poznań, 2004, s. 131-136.

## **THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE STRENGTH AL-CU BUTT BOND OBTAINED BY COLD METAL FORMING METHOD**

### **Abstract**

The results of the investigation of the influence of temperature on the strength of aluminium-copper bonds obtained by the technology of cold metal forming have been described. Bar sections have been joined by the method of upsetting their ends. The samples were annealed at 300, 400, 530, 540 and 570°C with various heating times and various ways of cooling. Structural examinations have shown that a zone of hard and brittle intermetallic compounds, CuAl, CuAl<sub>2</sub>, CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>, forms in the bond, beginning from the temperature of 400°C. The compounds are arranged in layers adhering to each other with the total thickness of 30 to 100 µm. All the bonds containing intermetallic compounds broke in bending test at a force several times lower than the one necessary to bend the given sample in not annealed condition. It has been found that the higher was the temperature of the bond heating, the lower is the value of the breaking force.

**Key words:** metal forming, cold bonding, quality of joint, copper, aluminium, power cable terminals