ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983
Seria: MECHANIKA z.78 Nr kol. 762

Marceli MAZUR, Wojciech MAZUR
Barbara BALCEROWSKA, Eugeniusz SZCZOK
Instytut Metaloznawstwa i Spawalnictwa
Politechniki Śląskiej

BADANIA SPAWALNOŚCI I WŁASNOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH BLACH ZE STOPU AlZn5Mg3 O WYTRZYMAŁOŚCI 450 MPa

Streszczenie. Scharakteryzowano spawalność stopów aluminium typu Al-Zn-Mg. Przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych i odporności korozyjnej doczołowych złączy spawanych blach o grubości 3-5 mm ze stopu AlZn5Mg3, oraz wyniki badań odporności na gorące pękanie tego stopu. Stwierdzono dużą podatność złączy ze stopu AlZn5Mg3 do pękania w wyniku korozji naprężeniowej oraz dużą wrażliwość do korozji warstwowej w SWC.

WPROWADZENIE

Spośród szerokiej grupy stopów aluminiowych stosowanych na konstrukcje spawane coraz większe znaczenie, ze względu na swoje własności, posiadają stopy grupy Al-Zn-Mg. Stopy te oprócz dobrej spawalności charakteryzują się zdolnością do samostarzenia się w spoinie i strefie wpływu ciepła. Ilość i stosunek podstawowych pierwiastków stopowych Zn i Mg oraz odpowiednia obróbka cieplna decydują zarówno o własnościach wytrzymałościowych stopu jak i dobrej spawalności i odporności na korozję naprężeniową. Maksymalne własności wytrzymałościowe materiału uzyskuje się przy sumarycznej zawartości Zn i Mg powyżej 9%. Obniżenie zawartości tych pierwiastków z 6 do 8 % polepsza spawalność oraz własności plastyczne przy minimalnie mniejszych własnościach wytrzymałościowych stopu.

Przy zawartości poniżej 6% zwiększa się podatność na przeróbkę plastyczną, przy znacznie obniżonych własnościach wytrzymałościowych [1]. W wyniku utwardzenia wydzieleniowego stopy Al-Zn-Mg mogą zwiększać swoje własności wytrzymałościowe 3-, 4- krotnie. Jednak wzrostowi temu nie towarzyszy wzrost odporności na korozję naprężeniową. Największą odporność na korozję naprężeniową osiągają stopy, w których sumaryczna zawartość Zn i Mg wynosi ok. 8% przy stosunku Zn : Mg = 2,7 - 2,9, tj. dla składu równowagi pomiędzy Al i fazą T ($Al_2Zn_3Mg_3$) [2].
Z grupy stopów o dużej zawartości Zn i Mg najbardziej znany jest amerykański stop 7039 (AlZn4Mg3) posiadający wysokie własności wytrzymałościowe i zadowalającą odporność na korozję naprężeniową. Do spawania wysokowytrzymałych stopów Al-Zn-Mg stosowane są przeważnie druty typu S-AlMg 4,5Mn oraz S-AlMg4Zn2. Druty o większej zawartości Zn pozwalają na uzyskanie złączy o wyższych własnościach wytrzymałościowych. Przykładowo przy spawaniu stopu 7039 drutami typu Al-Mg uzyskuje się wytrzymałość

złączy równą 280-300 MPa, stosując druty typu Al-Zn-Mg wytrzymałość złączy osiąga wartość 330-350 MPa [3]. Odporność na pękanie gorące złączy spawanych ze stopu Al-Zn-Mg zależy głównie od zawartości Mg w stopiwie i wzrasta z jego zawartością. Cynk praktycznie nie wpływa na zmianę odporności na gorące pękanie [4]. Charakterystyczną trudnością przy spawaniu stopu 7039 jest skłonność do powstawania w spoinach przyklejeń, szczególnie wtedy, gdy materiał dodatkowy zawiera Zn, tworzący na granicy fazy ciekłej i stałej łatwo topliwe związki cynku [3,5]. Krótki łuk, wyższe parametry prądowe i większe szybkości spawania zmniejszają w dużym stopniu występowanie przyklejeń w spoinach. Zalecane energie spawania stopu 7039 przedstawiono na rys.1 [3]. Stosowanie zaś zbyt dużych energii łuku może doprowadzić do przegrzania materiału w SWC, lub samego stopiwa - przy spawaniu wielowarstwowym, co prowadzi do spadku wytrzymałości złączy.

WYKONANIE ZŁĄCZY PRÓBNYCH

Do badań zostały użyte blachy gatunku AlZn5Mg3 (5,0 Zn; 2,9 Mg; 0,25 Cr; 0,15 Zr) grubości 3 i 5 mm w stanie sztucznie utwardzonym wydzieleniowo. W celu uzyskania wysokich własności wytrzymałościowych i dużej odporności na korozję naprężeniową materiał rodzimy poddany został obróbce cieplnej polegającej na: przesycaniu w temp. 440°C/2 godz, chłodzeniu w oleju w temp. 200°C/5 min, chłodzeniu w wodzie do temp. 20°C, starzeniu naturalnym w temp. 20°C/160 godz. i dwustopniowym starzeniu sztucznym w temp. 90°C/15 godz. i w temp. 150°C/10 godzin. Do spawania metodą TIG zastosowano automat AS13a-500, a do spawania metodą MIG automat spawalniczy AS14c-800. Jako materiał dodatkowy użyty został drut o średnicy 1,6 mm gatunku AG4Z2 (S-AlMg4Zn2) oraz drut gatunku S-MG45 (S-AlMg4,5Mn). Złącza o grubości 3 mm spawano w osłonie argonu automatycznie metodą TIG (I = 230A, U = 27V), przy czym blachy były przygotowane na I bez odstępu. Złącza o grubości 5 mm spawano automatycznie metodą MIG (I = 230A, U = 24V) bez ukosowania z odstępem 1 mm.

BADANIA WŁASNOŚCI ZŁĄCZY DOCZOŁOWYCH

Z wykonanych płyt próbnych pobrano próbki do badań mechanicznych, obejmujących statyczną próbę rozciągania złączy R_m, $R_{0,2}$, A_5 oraz próbę zginania. Zginanie przeprowadzono na trzpieniu o średnicy 2g. Badania mechaniczne złączy spawanych metodami TIG i MIG przeprowadzono po ich naturalnym starzeniu przez 30 dni. Wyniki prób rozciągania i zginania podano w tablicy 1. Pomiary twardości wykazały najwyższą twardość na linii wtopienia (105 HB), zaś najniższą w środku spoiny (70-80HB). Wzrost twardości na linii wtopienia spowodowany został nagromadzeniem się w tym miejscu

wydzieleń faz T ($Al_2Mg_3Zn_3$) i η($MgZn_2$), rozmieszczonych na granicach ziarn. Zostało to potwierdzone rentgenowską analizą fazową, która ujawniła największą intensywność pików dla próbek pobranych z linii wtopienia złączy.

Badania odporności materiału i złączy spawanych na korozję naprężeniową przeprowadzono metodą stałego obciążenia (próbki rozciągane) i metodą stałego odkształcenia (próbki zginane). W badaniach korozyjnych zastosowano roztwór 3 % NaCl + 0,5 % H_2O_2 zbuforowany dodatkami CH_3COOH i NaOH do pH4.

Próbki materiałowe i pobrane ze złączy spawanych obciążono do wystąpienia w nich naprężeń wynoszących ok. 0,9 $R_{0,2}$, tj. badania przeprowadzono przy naprężeniach wynoszących 350 MPa w przypadku materiału rodzimego i 210 MPa w przypadku złączy spawanych. Wyniki badań korozyjnych przedstawiono w tablicy 2.

BADANIA ODPORNOŚCI NA PĘKANIE GORĄCE

Badania przeprowadzono na próbkach blach o wymiarach 100x80 mm i grubości 5 mm ze stopu AlZn5Mg3 oraz w celach porównawczych na próbkach o grubości 6 mm ze stopu PA47 (AlZnMg1). Ocenę odporności stopów na pękanie gorące przeprowadzono przy użyciu próby Trans-Varestraint zgodnie z metodyką podaną w pracy [6]. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono; odkształcenie, przy którym pęknięcia zanikają - tzw. próg pękania ε_p , zakres temperatur, w którym w stopie powstają pęknięcia (TZK), krytyczną temperaturową intensywność narastania odkształceń (CST) i krytyczną prędkość odkształcania (CSS). Typowe pęknięcia pokazano na rys. 2a.

Jako podstawowe kryterium oceny przyjęto wartości CST obu stopów, pozostałe wskaźniki pękania ε_p, TZK i CSS stanowiły wartości pomocnicze. Przy wyborze kryterium kierowano się faktem, że zdolność metalu do odkształceń w wysokich temperaturach jest funkcją temperatury i prędkości odkształcania. W czasie spawania zmieniają się temperatura i prędkość odkształcania metalu w spoinie, a więc dla wywołania pęknięcia w dowolnym momencie czasu może być potrzebne różne odkształcenie. Jednoczesny wpływ obu czynników (temperatury i prędkości odkształcenia) na zdolność stopiwa do odkształcenia przedstawia CST, określająca dopuszczalny przyrost odkształcenia przy spadku temperatury, przy którym nie zostanie utworzone pęknięcie gorące (rys.3). Porównanie wartości CST obu badanych stopów pozwala stwierdzić, że mniej odporny na pękanie gorące jest stop AlZn5Mg3 (CST = 1,4 x 10^{-5} 1/°C) niż stop PA47 (CST = 2,0 x 10^{-5} 1/°C). Pozostałe wskaźniki pękania dla obu stopów wynoszą odpowiednio, dla stopu AlZn5Mg3 ε_p = 0,13 %, CSS = 1,7 x 10^{-5} 1/s, a dla stopu PA47 ε_p = 0,16 %, CSS = 4,2 x 10^{-5} 1/s.

Badania metalograficzne wykazały, że w przypadku stopu AlZn5Mg3 pęknięcia

gorące tworzą się w spoinie i strefie wpływu ciepła (rys.2.b).

W przypadku stopu PA47 w przetapianych próbkach obserwowano pęknięcia krystalizacyjne, mocno otwarte przy odkształcaniu zakrzepłego metalu, oraz tuż za nimi siatkę pęknięć podsolidusowych. W spoinach stopu AlZn5Mg3 występowały jedynie pęknięcia krystalizacyjne, przebiegające po granicach pierwotnych ziarn metalu.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Opracowany przez Instytut Metali Nieżelaznych konstrukcyjny stop aluminiowy AlZn5Mg3 powinien charakteryzować się wytrzymałością na rozciąganie min. 450 MPa, przy dużej odporności na korozję naprężeniową.
W wyniku przeprowadzonych badań pierwszych wytopów tego stopu stwierdzono, że własności mechaniczne blach o grubości 3-5 mm są zgodne z założeniami (tablica 1). Również odporność na korozję naprężeniową blach z tego stopu była wysoka. Dla przyjętych warunków badania, nawet po upływie 750 godz. nie stwierdzono na próbkach pęknięć i uszkodzeń korozyjnych. Tak wysoką odporność na korozję naprężeniową badany stop uzyskał dzięki złożonej obróbce cieplnej.

Badania odporności na gorące pękanie przy spawaniu stopu AlZn5Mg3 ujawniły jego dużą skłonność do pękania, nawet nieco wyższą niż stopu PA47 (AlZn5Mg1). Wynika to z nieco szerszego temperaturowego zakresu kruchości i niższego progu pękania.
Wskaźniki CST dla badanych stopów wynosiły:
- stop AlZn5Mg3 CST = $1,4 \times 10^{-5}$ $1/^{o}C$,
- stop AlZn5Mg1 CST = $2,0 \times 10^{-5}$ $1/^{o}C$,

co wskazuje na to, że w stopiwie AlZn5Mg3 pęknięcia gorące pojawiają się przy niższej prędkości odkształcania podczas stygnięcia spoiny. W przypadku stopu AlZn5Mg3 oprócz pęknięć w spoinie wystąpiły również pęknięcia w SWC, przebiegające po granicach dużych ziarn ułożonych pasmowo. Wskazuje to prawdopodobnie na niekorzystny skład chemiczny stopu i niewłaściwie przeprowadzony proces przeróbki plastycznej blach.
Analizując wyniki badań wytrzymałościowych złączy spawanych można stwierdzić nieco wyższe własności złączy spawanych metodą TIG w porównaniu z metodą MIG (tablica 1). Korzystniejsze z tego względu okazało się również spawanie drutami zawierającymi cynk (S-AlMg4Zn2). Szczególnie wyraźnie wyższe własności wytrzymałościowe złączy spawanych drutem S-AlMg4Zn2, niż drutem S-AlMg4,5Mn ujawnia się przy spawaniu grubszych blach, ze względu na występujący wtedy duży udział metalu spoiwa w spoinach. Przy spawaniu metodą MIG drutem S-AlMg4Zn2 uzyskano niższe własności wytrzymałościowe złączy dla próbek z nie obrobionym licem i granicą spoiny, w porównaniu do próbek obrobionych. Może to wskazywać na tzw. krawędziową wrażliwość złączy z tego stopu na działanie karbu.

Złącza spawane okazały się również bardzo wrażliwe do pękania w wyniku korozji naprężeniowej (tablica 2). Niezależnie od zastosowanego spoiwa próbki ze złączy pękały przeważnie w pobliżu linii wtopienia po upływie 10-95 godz. W pobliżu powierzchni przełomu można było zaobserwować cienką warstewkę z małą ilością wydzieleń fazowych.

W złączach spawanych, badanych metodą stałego odkształcenia, pierwsze objawy korozji warstwowej obserwowano już po 4 dniach ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym. Na zgładach metalograficznych obserwowano zapoczątkowanie pęknięć w przejściu spoiny i silną korozję warstwową w SWC złączy. W wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania w SWC została zlikwidowana korzystna substruktura materiału rodzimego, jaką posiadał dzięki zastosowanej obróbce cieplnej. Wywołało to tak silne uwrażliwienie tej strefy złącza na korozję warstwową, że po 10 dniach ekspozycji próbek w roztworze korozyjnym zmniejszenie ich przekroju osiągało 50 % (rys.4).

Na duże trudności w uzyskaniu spawalnego stopu aluminiowego typu AlZn5Mg3 wskazuje fakt wycofania tego stopu z norm DIN [2]. Znacznie lepiej zbadanym niż stop AlZn5Mg3 jest stop 7039 (AlZn4Mg3) o nieco niższej wytrzymałości, lecz dobrej odporności korozyjnej, zaś złącza spawane osiągają ten sam poziom wytrzymałości co złącza ze stopu AlZn5Mg3, przy znacznie lepszej odporności na korozję naprężeniową.

WNIOSKI

- Badany stop aluminiowy AlZn5Mg3, o wytrzymałości 450 MPa, charakteryzuje się dużą odpornością na korozję naprężeniową. Stop ten jest jednak skłonny do pęknięć gorących przy spawaniu.
- Doczołowe złącza spawane metodami TIG i MIG przy użyciu drutów S-AlMg 4,5Mn i S-AlMg4Zn2 osiągają po jednym miesiącu starzenia naturalnego wytrzymałość 320-370 MPa, przy czym wyższą wytrzymałość posiadają złącza spawane drutem zawierającym cynk.
- Złącza spawane ze stopu AlZn5Mg3 są wrażliwe do pękania w wyniku korozji warstwowej w strefie wpływu ciepła.
- Przeprowadzone badania stopu AlZn5Mg3 oraz dane literaturowe wskazują na korzystniejszy zespół własności stopu 7039 (AlZn4Mg3).

LITERATURA

[1] Sprawozdanie IMN nr 2684/80 z pracy 2/N.3.14/1 pt.: Opracowanie nowego wysokowytrzymałego i spawalnego stopu w gat. AlZnMg dla potrzeb przemysłu okrętowego.

[2] Grühl W.: The stress corrosion behaviour of high strength AlZnMg alloys. Aluminium, nr 5, 1978, s.323.

[3] Robinson J.B.; Baysinger F.: Welding Aluminium Alloy 7039. Welding Journal nr 10, 1960, s.433.

[4] Dudas J.H., Colins ER.: Preventing weld cracks in high strenght aluminium alloys. Welding Journal nr 6, 1966, s.241.
[5] Liptak J.A.: Technigues for welding 7039 aluminium with various inert gas processes. Welding Journal nr 12, 1966, s.561.
[6] Senda T. i inni: Fundamental investigations on solidifications crak susceptibility for weld metals with Trans - Verestraint test. Transactions of Japan Welding Society, vol.2, nr 2, 1971.

Recenzent

Doc.dr inż. S. Bryś

EXPERIMENTS ON THE WELDABILITY AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF THE SHEETS OF THE ALLOY Al Zn 5 Mg 3 AND OF THE STRENGTH 450 MPa

SUMMARY

The weldability of aluminium alloys type Al-Zn-Mg has been characterized. Results of strength and corrosion resistance of butt welded joints of the sheets thickness 3-5 mm from the alloy AlZn5Mg3 and results resistance on hot crocking of that alloy have been shown. Low stress cracking resistance and high exfoliation corrosion in HAZ of AlZn5Mg3 alloy welded joints has been stated.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ И СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ СВАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ СО СПЛАВА AlZn5Mg3 ОБЛАДАЮЩИХ ПРОЧНОСТЬЮ 450 МПА

РЕЗЮМЕ

В настоящей работе характеризовались свариваемость алюминиевых сплавов типа AlZn5Mg3. Были представлены результаты исследований прочности и коррозионной устойчивости стыков соединений сварных металлических листов толщиной 3-5 мм со сплава AlZn5Mg3, а также результаты исследований устойчивости к горячему растрескиванию этого сплава. Была определена большая восприимчивость соединений изготовленных со сплава AlZn5Mg3 к растрескиванию в результате коррозии напряженного материала, а также высокая чувствительность к слоевой коррозии в зоне термического влияния.

Tablica 1

Własności mechaniczne materiału blach i doczołowych złączy spawanych ze stopu AlZn5Mg3

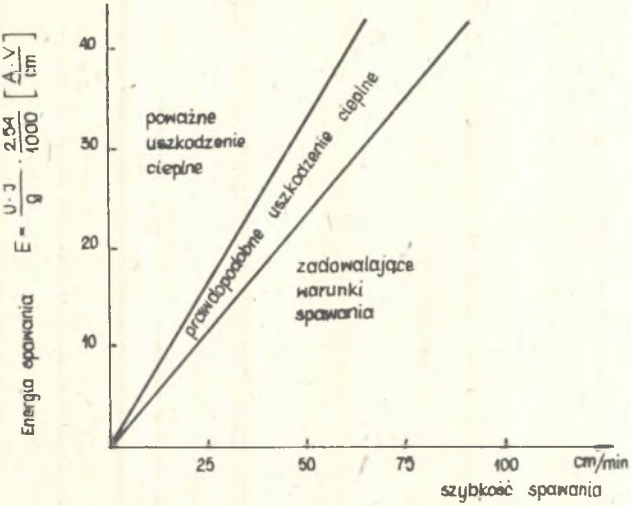
Lp.	Grubość blachy, mm	Metoda spawania	Spoiwo	Rodzaj próbki	R_m MPa	$R_{0,2}$ MPa	A_5 %	Kąty gięcia, Ø trzpienia 2 g	
								rozciąganie lica	rozciąganie grani
1	3	-	-	-	450-459 / 453	376-390 / 383	11,9-13,7 / 13,0	-	-
2		TIG autom.	S-MG45 (S-AlMg4,5Mn)	obrobione lico i grań	366-378 / 372	253-265 / 260	5,3-5,8 / 5,6	100-110 / 105	-
3			AG4Z2 (S-AlMg4Zn2)		366-393 / 380	258-295 / 275	5,8-7,8 / 7,0	95-115 / 105	-
4	5	-	-	-	438-446 / 443	364-382 / 373	11,6-12,2 / 11,8	-	-
5		MIG autom.	S-MG45	obrobione lico i grań	280-320 / 305	230-260 / 245	4,5-5,6 / 5,0	-	-
6			AG4Z2		328-395 / 360	248-274 / 264	3,3-6,2 / 4,7	65-80 / 73	45-60 / 52
7				nieobr. lico i grań	296-333 / 315	257-289 / 272	2,6-5,6 / 4,4	-	-

Uwagi : 1. Złącza spawane były starzone naturalnie 30 dni , 2. Poz.1 i 4 dotyczy materiału rodzimego.

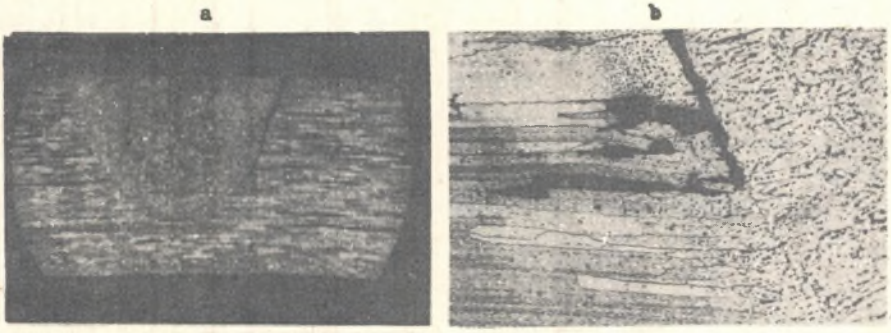
Tablica 2

Wyniki badań korozji naprężeniowej

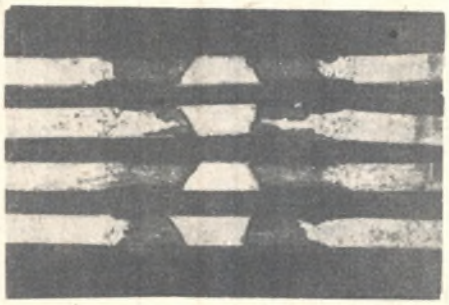
Lp.	Rodzaj próbek	Metoda spawania Rodzaj drutu	Metoda badań Naprężenie	Czas do zerwania próbki, godz.	Uwagi
1.	Materiał rodzimy (MR) g = 3 mm	-	rozciąganie 350 MPa	5 próbek pow.750	brak pęknięć i uszkodzeń korozyjnych
2.	MR g = 5 mm	-	zginanie 350 MPa	3 próbki pow.1000	j.w.
3.	Złącze doczołowe (ZD) g = 3 mm	TIG S-AlMg4Zn2	rozciąganie 210 MPa	10,12,15, 24,95	zerwanie w przejściu
		TIG S-AlMg4,5Mn	j.w.	10,60,93	zerwanie w przejściu lub w SWC
4.	ZD g = 5 mm	MIG S-AlMg4Zn2	zginanie 210 MPa	-	silna korozja warstwowa już po 10 dniach
		MIG S-AlMg4,5Mn	j.w.	-	



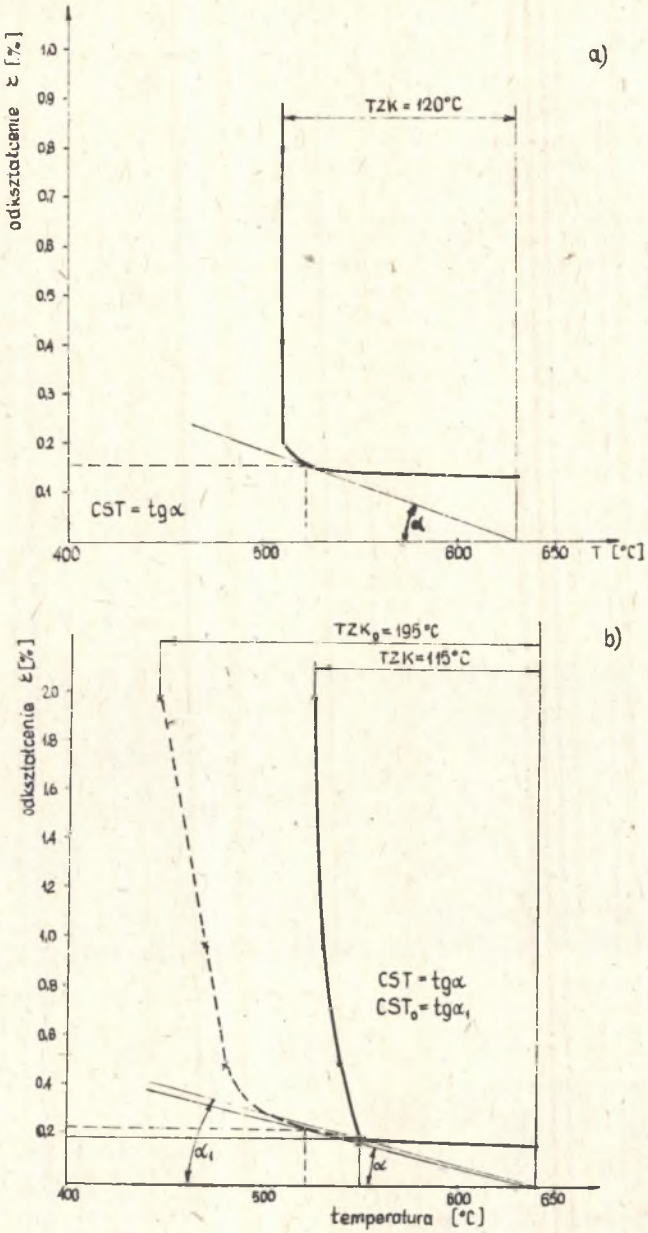
Rys.1. Graniczne parametry spawania stopu 7039 [3].



Rys.2. Typowe pęknięcia gorące przy spawaniu stopu AlZn5Mg3. Traw. odczynnik Kellera.
a) pęknięcia w spoinie i SWC, pow. 10x,
b) pęknięcia w linii wtopienia, pow. 120x.



Rys.4. Uszkodzenia korozyjne (korozja warstwowa) w strefie wpływu ciepła złączy spawanych metodą MIG, po 10 dniach ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym. Pow. 1x.



Rys.3. Przebieg zmian plastyczności stopiwa:
a) stop AlZn5Mg3,
b) stop PA47 (AlZn5Mg1) - linia przerywana dotyczy zmian plastyczności w SWC.