

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Article

Spawanie ramy motocyklowej ze stopu aluminium metodami TIG i MIG The aluminum alloy motorcycle frame welding with TIG and MIG methods

Sławomir Bania¹, Anna Janeczek^{2,*}, Dariusz Fydrych^{2,*}

¹ Stocznia Remontowa NAUTA S.A., ul. Czechosłowacka 3, 81-336 Gdynia, s.bania@nauta.pl (S.B.)

² Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

* Correspondence: anna.janeczek@pg.edu.pl (A.J.), dariusz.fydrych@pg.edu.pl (D.F.), Tel.: +48 58 347-23-66 (A.J.)

Received: date; Accepted: date; Published: date

Streszczenie:

Naprawa uszkodzonych elementów konstrukcji technologiami spawalniczymi może pozwolić na przywrócenie im własności eksploatacyjnych przy stosunkowo niskich kosztach i krótkim czasie wyłączenia z użytkowania. W pracy porównano cztery technologie spawania ramy motocyklowej Kawasaki wykonanej ze stopu aluminium PA11 (AW 5754, Wr. nr. 3.3535, AlMg3). Spawanie przeprowadzono procesami TIG oraz MIG z wykorzystaniem materiałów dodatkowych AlSi5, AlMg5Mn i AlMg5Cr. Złącza zostały poddane badaniom wizualnym oraz badaniom niszczącym: statycznej próbie rozciągania i pomiarom twardości metodą Vickersa. Stwierdzono, że obydwie metody spawania są skutecznym sposobem naprawy ramy, a materiały dodatkowe zawierające Mg pozwalają uzyskać złącze spawane o wytrzymałości na rozciąganie około 10 MPa wyższej, niż spoiwo AlSi5. Twardość spoiny wykonanej z użyciem materiału dodatkowego AlSi5 była wyższa o 14 do 22 HV10 niż twardość spoin wykonanych ze spoiwami AlMg5Mn i AlMg5Cr.

Abstract:

Repair of damaged structural elements with the use of welding technologies may allow to restore operational properties at relatively low cost and short time off from use. The paper compares four welding technologies for Kawasaki's motorcycle frame made of PA11 (AW 5754, Wr. nr. 3.3535, AlMg3) aluminum alloy. Welding was carried out using TIG and MIG processes using AlSi5, AlMg5Mn and AlMg5Cr consumables. The joints were subjected to visual and destructive tests: static tensile test and hardness measurements using the Vickers method. It has been found, that both welding methods are an effective way to repair the frame, and consumables containing Mg allow to obtain a welded joint with a tensile strength of about 10 MPa higher than that of AlSi5. The hardness of the weld made with the AlSi5 consumable was 14 to 22 HV10 higher than the hardness of the welds made with AlMg5Mn and AlMg5Cr.

Słowa kluczowe: TIG; MIG; rama motocyklowa; stopy aluminium; AlMg3

Keywords: TIG; MIG; motorcycle frame; aluminum alloys; AlMg3

Wstęp

Konstrukcja motocykla powinna zapewniać bezpieczeństwo kierowcy, wygodę podczas jazdy oraz możliwość dostosowania prędkości, w zależności od jego przeznaczenia (np. motocykl turystyczny lub sportowy) do warunków drogowych. Niezwykle istotna jest również odpowiednia trakcja pojazdu, która pośrednio związana jest z zastosowanymi materiałami konstrukcyjnymi. Rama jest główną częścią motocykla przenoszącą obciążenia, więc materiały na ramy motocyklowe powinny posiadać następujące cechy [1-4]:

- wysoką wytrzymałość mechaniczną,
- dobre właściwości technologiczne, takie jak: lejność, spawalność, podatność na przeróbkę plastyczną,
- niską masę,
- niską cenę.

Pierwsze ramy motocyklowe wykonywane były ze stali, szczególnie ze stopów z dodatkiem chromu i manganu, które zwiększały ich wytrzymałość. Jednak wraz ze wzrostem wytrzymałości stali zwiększała się ich twardość oraz kruchość, przez co ramy podczas wypadków były narażone na pękanie. Ramy te były również podatne na korozję i posiadały stosunkowo dużą masę, co obniżało maksymalną prędkość motocykla [2,3,5]. W kolejnych latach ramy wykonywane były także ze stopów tytanu. Ich zastosowanie zmniejszyło masę motocykla, przy czym zwiększyło jego wytrzymałość, a także poprawiło ciągliwość i odporność na korozję [3,6].

Nowszym materiałem konstrukcyjnym stosowanym w produkcji motocykli są włókna węglowe. Znajdują one zastosowanie przede wszystkim w motocyklach o charakterze sportowym, ze względu na niską gęstość włókien.

31 Ramy wykonane z tego materiału zyskują bardzo wysokie własności wytrzymałościowe, a przy tym są odporne na
32 drgania, odporne chemicznie i trudnotopliwe. Jest to jednak materiał stosunkowo drogi i jeszcze nie tak
33 rozpowszechniony jak najbardziej popularne aluminium [2,3,6,7]. Pod koniec XX wieku pierwszy raz zastosowano
34 stopy aluminium do produkcji ram motocyklowych. Zmieniło to rynek znacząco dzięki około trzykrotnej redukcji
35 masy w stosunku do stali, wyższej wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na korozję oraz relatywnie niskiej cenie.
36 Dalsze próby obniżania masy motocykli doprowadziły także do łączenia aluminium z włóknami węglowymi. Obecnie
37 stopy aluminium są podstawowym materiałem stosowanym do produkcji ram motocyklowych. Najczęściej stosuje się
38 stopy aluminium z magnezem, manganem, miedzią, cynkiem lub krzemem oraz ich kombinacje [2,3,6,8-12].

39 Spawalność aluminium i jego stopów jest ograniczona ze względu na jego właściwości fizyko-chemiczne
40 [8,10,11,13]:

- 41 - wysoka wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego,
- 42 - wysoka wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej,
- 43 - duży skurcz,
- 44 - wysokie powinowactwo chemiczne do tlenu,
- 45 - wysoka skłonność do rozpuszczania gazów.

46 Wysoka wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego powoduje trudności z miejscowym nagraniem
47 materiału oraz prowadzi do tworzenia się szerokiej strefy wpływu ciepła (SWC). Wysoki współczynnik
48 rozszerzalności cieplnej i skurczu zwiększa skłonność do występowania naprężeń i odkształceń oraz formowania się
49 niezgodności spawalniczych, a zwłaszcza pęknięć krystalizacyjnych [11,13,14]. Aluminium, reagując z tlenem,
50 tworzy trudnotopliwą i trudno rozpuszczalną warstwę tlenków aluminium Al_2O_3 (temperatura topnienia $2060^\circ C$) na
51 powierzchni metalu. Najprostszą i najbardziej skuteczną metodą ich usuwania podczas spawania jest czyszczenie
52 katodowe. Zjawisko to zachodzi podczas spawania prądem z biegunowością dodatnią. Polega ono na wybijaniu
53 cząsteczek tlenków przez jony dodatnie [10-12,15,16]. Zdolność aluminium do rozpuszczania gazów zmniejsza się
54 podczas stygnięcia, a przede wszystkim w czasie krystalizacji jeziorka spawalniczego. Ta cecha może powodować
55 niezgodności w postaci porowatości i pęknięć wywołanych obecnością gazów (np. wodoru) w spoinie [10,12,17].

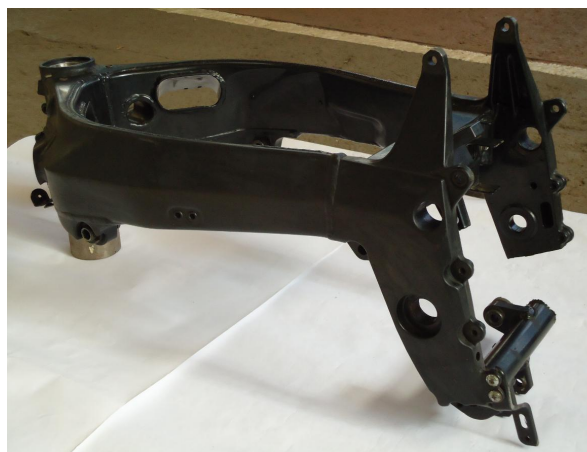
56 Aluminium wykazuje podatność na spawanie metodą gazową, elektrodą otuloną, w osłonie gazów obojętnych,
57 plazmą, wiązką laserową oraz wiązką elektronów. Często wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym są także
58 metody łączenia: zgrzewanie tarciove z przemieszaniem (FSW) i zgrzewanie punktowe oporowe [8,10,12,13,17,18].
59 W przypadku elementów konstrukcji motocykli, ze względu na wydajność i koszty produkcji, stosuje się głównie
60 metody TIG i MIG, w tym odmiany spawania zmechanizowanego i zrobotyzowanego. Złącza wykonane tymi
61 metodami są odporne na korozję i, co ważne w kontekście spawania ramy motocyklowej, wysoka wytrzymałość
62 pozwala na ich zastosowanie w odpowiedzialnych, narażonych na duże naprężenia konstrukcjach [8,12,18,19]. Gaz
63 osłonowy do spawania aluminium i jego stopów, ze względu na wysoką reaktywność chemiczną metalu, powinien
64 mieć charakter obojętny. Główne zastosowanie znalazł argon (99,98%) oraz mieszanina argonu z helum (np. 70% Ar i
65 30% He). Argon jest cięższy od powietrza, dzięki czemu dobrze chroni jeziorko spawalnicze w podstawowych
66 pozycjach spawania. Ponadto jego niska energia jonizacji ułatwia zajarzenie i dobrze stabilizuje łuk elektryczny, co
67 czyni gaz wydajnym. Dodatek helu pozwala na uzyskanie większej głębokości wtopienia spoiny, gdyż charakteryzuje
68 się on wyższym niż argon współczynnikiem przewodności cieplnej [10,18,20,21].

69 Na podstawie przeglądu literatury ustalono, że brakuje informacji na temat wykorzystania procesów
70 spawalniczych do spawania i naprawy ram motocyklowych wykonanych ze stopów aluminium. Z nielicznych prac
71 wynika, że zostały przeprowadzone badania tylnego wahacza motocykla ze stali S355 spawanego metodą MAG [22].
72 W pracy tej sprawdzono wpływ parametrów spawania na rozkład naprężeń i odkształceń szczałkowych. Stwierdzono,
73 że naprężenia i odkształcenia wzrastają wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu spawania. Ze względu na bardzo
74 ograniczoną wiedzę w tym zakresie jako cel pracy przyjęto weryfikację możliwości przeprowadzenia naprawy
75 uszkodzonej aluminiowej ramy motocyklowej dwoma powszechnie dostępnymi metodami spawania: TIG i MIG.

76 **Badania własne**

77 Przedmiotem badania była rama motocyklowa typu twin-spar firmy Kawasaki, model ZXR750R Ninja (Rys. 1
78 a). Rama została wyprodukowana w roku 1997 (Rys. 1 b). Tego typu ramy charakteryzują się dużą sztywnością,
79 między innymi dzięki łagodnie wygiętej górnej części i sposobie montowania silnika, który odbiera część obciążenia z
80 ramy. Stosowane są w motocyklach sportowych o niskiej masie, przeznaczonych do jazdy z wysokimi prędkościami
81 [4,5,23]. Rama posiadała pęknięcie eksploatacyjne, którego naprawę eksperymentalnie zasymulowano.
82





(a)

(b)

Rys. 1. Motocykl Kawasaki, model ZXR750R: (a) widok ogólny pojazdu [24]; (b) rama motocyklowa.

Ze względu na brak informacji o składzie chemicznym materiału ramy, wykonano jego analizę metodą pojedynczych wyiskrzeń, wykorzystując emisyjny spektrometr optyczny Spectrolab typ LAB 05. Wyniki analizy przedstawione są w Tablicy I. Na podstawie analizy składu chemicznego stwierdzono, że rama motocyklowa wykonana była ze stopu AlMg3 (PA11, AW 5754, Wr. nr. 3.3535).

Tablica I. Analiza składu chemicznego ramy motocyklowej

Wyiskrzenie/ Pierwiastek [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Sn	Ti	Ag	B
1	0,1803	0,3092	0,02	0,0061	0,4952	<0,008	<0,005	<0,0848	0,0094	0,0303	0,0115	0,0018	0,0108
2	0,1754	0,3076	0,0212	0,0055	0,4879	<0,008	<0,005	<0,0848	0,0051	0,0289	0,0111	0,0015	0,0103
3	0,1708	0,307	0,0202	0,0055	0,4916	<0,008	<0,005	<0,0848	<0,005	0,0249	0,01	0,0014	0,0097
średnia	0,1755	0,3079	0,0205	0,0057	0,4916	0,008	0,005	0,0848	0,0065	0,028	0,0109	0,0016	0,0103

cd.

Wyiskrzenie/ Pierwiastek [%]	Be	Bi	Ca	Cd	Na	Sr	Li	Zr	Co	V	Ga	Al
1	<0,0001	0,0203	0,017	0,0313	0,0009	0,0013	<0,0001	0,0022	<0,002	0,0185	0,0101	Balance
2	<0,0001	0,0141	0,033	0,0292	0,0032	<0,001	<0,0001	0,0032	<0,002	0,0178	0,0095	Balance
3	<0,0001	0,0129	0,019	0,0282	0,0009	<0,001	<0,0001	0,0018	<0,002	0,0178	0,0096	Balance
średnia	0,0001	0,0158	0,023	0,0296	0,0017	0,0011	0,0001	0,0024	0,002	0,018	0,0097	Balance

Następnie z ramy wycięte zostały próbki o grubości 2-3 mm i pozostałych wymiarach około 90x180 mm. Próbki zostały oczyszczone z powłoki ochronnej mechanicznie i chemicznie preparatem Procap A7, a krawędzie zostały przygotowane bez ukosowania (na I), zgodnie z normą PN-EN ISO 9692-3:2016-10. Blachy zostały wstępnie szczipione, w każdym przypadku metodą identyczną z metodą wykonania złącza oraz zamocowane do stołu spawalniczego z 1 mm odstępem między spawanym krawędziami.

Ze względu na ograniczoną ilość dostępnego materiału podstawowego wykonano dwa złącza metodą TIG (141) oraz dwa złącza metodą MIG (131). Materiały dodatkowe zostały dobrane do materiału podstawowego, stopu AlMg3, na podstawie katalogów producentów. W każdym przypadku, jako gaz osłonowy, użyto argonu o czystości 99,9996% (II, PN-EN ISO 14175:2009). Do próbek wykonanych metodą TIG wykorzystano spoiwa w postaci prętów, wykonanych ze stopu AlSi5 (Lincoln Electric) w przypadku pierwszej próbki i AlMg5Mn (Lincoln Electric) dla drugiej próbki. Natomiast próbki wykonane metodą MIG wymagały wykorzystania materiałów dodatkowych, w postaci drutów elektrodowych, wykonanych z materiału AlSi5 (MOST), w przypadku pierwszej próbki oraz AlMg5Cr (ESAB) dla drugiej próbki. Zestawienie materiałów dodatkowych wraz ich właściwościami przedstawiono w Tablicy II. Złącza spawane oznaczono w sposób podany w Tablicy III. Wszystkie złącza wykonano w pozycji podolnej (PA). Zastosowano urządzenia spawalnicze: Kemppi MasterTig MLS 2300 AC/DC oraz Kemppi FastMig 430. Złącza wykonane metodą TIG, dla wypełnienia rowka spawalniczego, wymagały położenia dwóch ściegów. Zestawienie parametrów spawania przedstawia Tablica III. Natężenie przepływu gazu osłonowego we wszystkich przypadkach wynosiło 12 l/min. Ilość wprowadzonego ciepła obliczono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1011-1. Widok złączy spawanych przedstawia Rysunek 2.

Tablica II. Materiały dodatkowe do spawania [25-27]



Oznaczenie próbki	Rodzaj materiału dodatkowego	Producent materiału dodatkowego	Oznaczenie producenta	Skład chemiczny materiału dodatkowego	Średnica materiału dodatkowego [mm]
TSi	pręt	Lincoln Electric	SuperGlaze TIG 4043	AlSi5	1,6
TMg	pręt	Lincoln Electric	SuperGlaze TIG 5183	AlMg5Mn	3,2
MSi	drut elektrodowy	MOST	MOST AlSi5 (IA 4043)	AlSi5	1,2
MMg	drut elektrodowy	ESAB	OK Autorod 5356	AlMg5Cr	1

114 cd.

Oznaczenie próbki	Typowy skład chemiczny materiału dodatkowego [%]										Własności mechaniczne materiału dodatkowego		
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Umowna granica plastyczności [N/mm ²]	Wytrzymałość na rozciąganie [N/mm ²]	Wydłużenie [%]
TSi	Balance	4,5-6	<0,6	0,05-0,02	<0,05	-	-	<0,1	-	<0,0003	20-40	120-165	3-18
TMg	Balance	<0,4	<0,4	<0,1	0,5-1	4,3-5,2	0,05-0,25	<0,25	<0,15	<0,0003	125-165	270-290	16-25
MSi	Balance	4,5-5,5	<0,4	0,05	0,1	0,1	-	-	<0,25	-	< 50	120-150	10-18
MMg	Balance	<0,25	<0,4	-	<0,2	5	-	-	-	-	120	265	26

115

116 Tablica III. Warunki i parametry spawania

Oznaczenie próbki	Numer ściegu	Proces spawania	Skład chemiczny materiału dodatkowego	Rodzaj prądu spawania/biegunowość	Natężenie prądu spawania [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
TSi	1	TIG	AlSi5	AC	79	11,8	-	16,5	0,20
	2					11,9		16,7	0,20
TMg	1	TIG	AlMg5Mn	AC	79	12,2	-	16,3	0,21
	2					12,1		16,5	0,20
MSi	1	MIG	AlSi5	DC+	90	12,0	3,8-4,1	32,0	0,16
MMg	1	MIG	AlMg5Cr	DC+	83	13,0	3,8-4,1	33,0	0,15

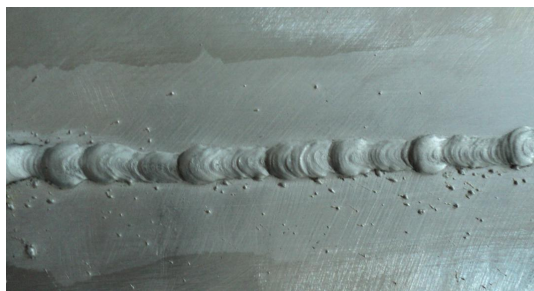
117



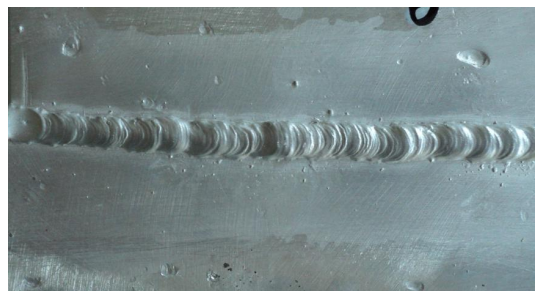
(a)



(b)



(c)



(d)

118 **Rys. 2.** Widok złączy spawanych: (a) TSi; (b) TMg; (c) MSi; (d) MMg.

119

120 Po spawaniu wykonano badania wizualne (VT) według wskazań normy PN-EN ISO 17637:2017-02. Po
 121 badaniach nieniszczących przeprowadzono badania niszczące złączy: statyczną próbę rozciągania oraz pomiary
 122 twardości. W celu przygotowania do pomiarów twardości próbki zainkludowano w żywicy epoksydowej, szlifowano
 123 na papierach o ziarnistości P150-1000, polerowano oraz trawiono z wykorzystaniem odczynnika Kellera (95 mL H₂O,
 124 2,5 mL HNO₃, 1,5 mL HCl, 1,0 mL HF). Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa HV10 na każdej próbce w
 125 spoinie, SWC oraz materiale rodzimym po obydwu stronach spoiny, zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2018-05.
 126 Próbkę oraz statyczną próbę rozciągania przygotowano i wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020-05.

127 Wyniki

128 Podczas badań wizualnych próbek wykonanych metodą TIG stwierdzono, że spoiny są wolne od niezgodności
 129 spawalniczych oraz odprysków. Spoiny są symetryczne, z SWC o niewielkiej szerokości. Natomiast spoiny wykonane
 130 metodą MIG charakteryzują się wyższym nadlewem, zauważono także przyklejenie oraz odpryski metalu,
 131 wymagające usunięcia. Ponadto stwierdzono, że spoiny wykonane z użyciem spoiw z Mg (TMg, MMg)
 132 charakteryzują się jaśniejszym (srebrnym) kolorem, niż spoiny wykonane ze spoiwami zawierającymi Si. Dodatkowo,
 133 w złączach, do których wykonania użyto materiałów dodatkowych o większej średnicy - TMg (Ø3,2 mm) i MSi (Ø1,2
 134 mm) - stwierdzono większy nadlew niż odpowiednio w TSi (Ø1,6 mm) i MMg (Ø1 mm).

135 Wyniki uzyskane podczas statycznej próby rozciągania próbek zawarte są w Tablicy IV. Analizując wyniki
 136 próby rozciągania, można zauważyć, że złącza wykonane metodą TIG (TSi i TMg) wykazują wyższą wartość
 137 wytrzymałości na rozciąganie. Ponadto wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie posiadają złącza wykonane
 138 spoiwami z Mg (TMg i MMg). Próbkę spawaną, do których wykonania wykorzystano materiał AlSi5 (TSi i MSi),
 139 zerwały się w spoinie, natomiast pozostałe w SWC. W porównaniu do materiału rodzimego, wytrzymałość na
 140 rozciąganie próbek TMg i MMg jest wyższa.

141

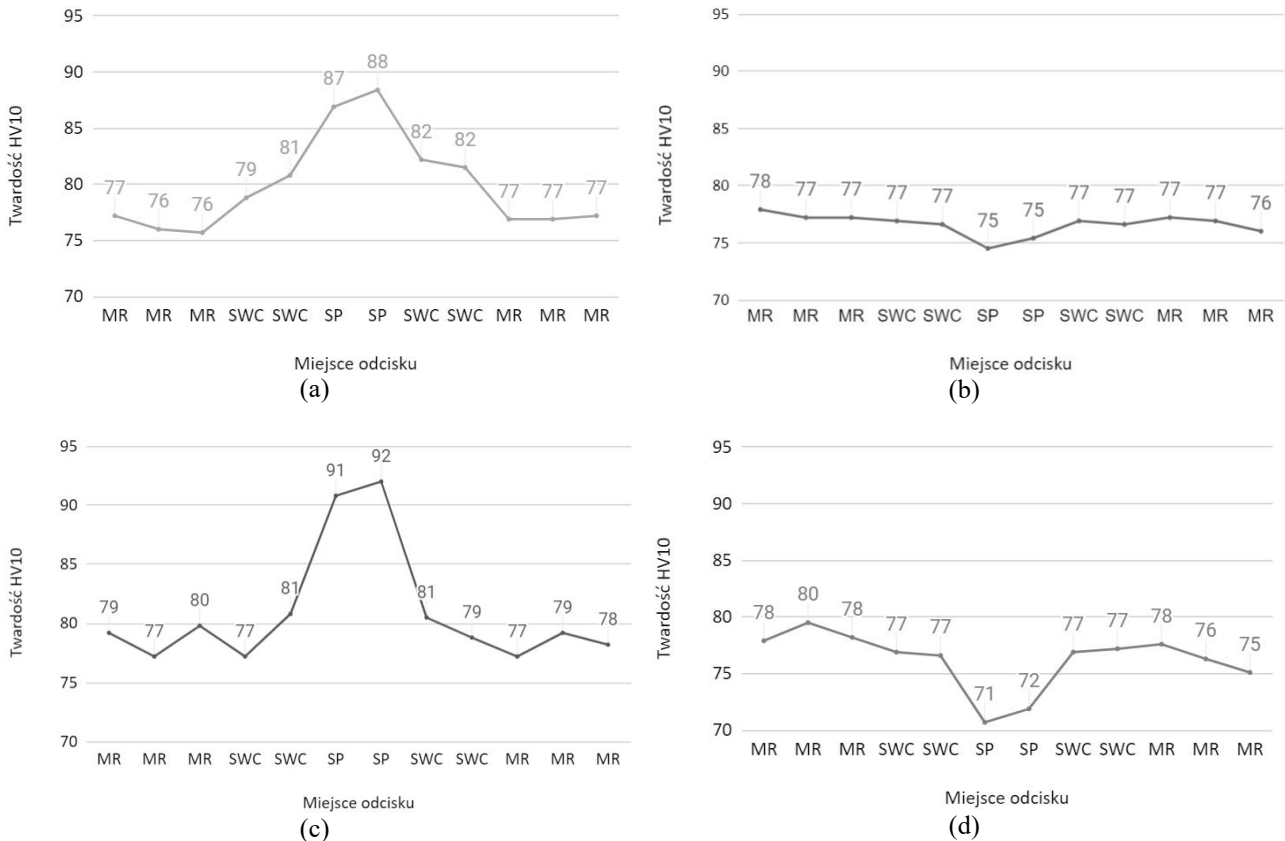
142 **Tablica IV.** Wyniki statycznej próby rozciągania

Oznaczenie próbki	Materiał dodatkowy/ materiał rodzimy	Miejsce zerwania próbki	Przekrój spoiny/ próbki w miejscu pęknięcia [mm ²]	Siła zerwania próbki [N]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [N/mm ²]
TSi	AlSi5	spoina	22	2100	95,4
TMg	AlMg5Mn	SWC	20	2100	105,0
MSi	AlSi5	spoina	26	2400	92,3
MMg	AlMg5Cr	SWC	18	1850	102,7
MR	AlMg3	MR	14	1380	98,5

43

44 Wyniki pomiarów twardości prezentują wykresy przedstawione na Rysunku 4. Z analizy wyników badań można
 45 stwierdzić, że spoiwa typu AlSi5 umożliwiają wykonanie spoiny o większej twardości niż materiały dodatkowe z
 46 dodatkiem magnezu. W przypadku porównywania metod spawania, nie ma tu oczywiście zależności, ponieważ wyniki
 47 pomiarów twardości spoin w złączach spawanych wykonanych z materiałem dodatkowym zawierającym krzem są
 48 wyższe dla metody MIG (MSi), natomiast dla spoin, w których zastosowano spoiwo z dodatkiem magnezu, wyższe
 49 wyniki wykazuje metoda TIG (TMg). Najwyższą twardość można zaobserwować dla spoiny wykonanej metodą MIG
 50 z materiałem dodatkowym AlSi5 (MSi), natomiast najniższą również dla metody MIG, z materiałem AlMg5Cr

151 (MMg). Dla złączy wykonanych z zastosowaniem spoiw z Mg (TMg i MMg) twardość w miejscu spoiny jest niższa
 152 niż w SWC lub w materiale rodzimym. Zaobserwowano również, że wyniki w SWC są zbliżone do wyników w
 153 materiale rodzimym. Wyniki pomiaru twardości dla spoiwa z dodatkiem Mg wykazują dużo mniejszą zmienność, niż
 154 te wykonane przy zastosowaniu spoiwa z dodatkiem Si niezależnie od zastosowanego procesu spawania.
 155



156 **Rys. 4.** Wyniki pomiarów twardości dla: (a) TSi; (b) TMg; (c) MSi; (d) MMg.

157 **Podsumowanie i wnioski**

158 W celu weryfikacji możliwości naprawy pęknięcia eksploatacyjnego w ramie motocyklowej wykonano badania
 159 symulujące proces naprawy z wykorzystaniem dwóch różnych metod spawania (TIG i MIG) i różnych materiałów
 160 dodatkowych (AlSi5, AlMg5Mn i AlMg5Cr).

161 Na podstawie wyników badań wizualnych, statycznej próby rozciągania i pomiarów twardości zweryfikowano
 162 pozytywnie możliwość zastosowania procesów spawania do naprawy pęknięć aluminiowej ramy motocyklowej
 163 Kawasaki. Złącza wykonane metodami TIG lub MIG nie wykazują znacznych różnic pod względem wytrzymałości na
 164 rozciąganie i twardości. Różnica widoczna jest natomiast w ogólnej estetyce spoiny i wydajności spawania, gdyż w
 165 przypadku metody TIG, aby wypełnić rowek spawalniczy, należało wykonać dwa ściegi, natomiast stosując metodę
 166 MIG wystarczające było wykonanie jednego ściegu. Spawanie metodą MIG wiąże się również ze zmniejszeniem
 167 ilości wprowadzonego ciepła do złącza, co zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia naprężeń oraz odkształceń w
 168 złączu spawanym.

169 Znaczącą różnicę zaobserwowano w doborze materiału dodatkowego do spawania. Próba rozciągania pozwoliła
 170 zauważyć, że stosując spoiwo z dodatkiem magnezu w ilości 5% (TMg i MMg), otrzymuje się spoinę o wyższej
 171 wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do spoiny wykonanej z dodatkiem AlSi5 (TSi i MSi). Próbkę TMg oraz
 172 MMg zerwały się w SWC, natomiast próbki TSi oraz MSi, w spoinie. Ta zależność widoczna jest także w wynikach
 173 badań twardości metodą Vickersa HV10, w których zaobserwowano, że większą twardość (a więc też kruchość)
 174 wykazują spoiny z materiałem dodatkowym w postaci AlSi5 (TSi i MSi). Z przeglądu literatury odnoszącej się do
 175 spawania z materiałami dodatkowymi AlSi5, AlMg5Mn lub AlMg5Cr wynika, że otrzymane własności mechaniczne
 176 złączy są zbliżone z wynikami przedstawionymi w literaturze. Dotyczy to przede wszystkim rozkładów twardości
 177 złączy wykonanych z użyciem różnych spoiw [28-30].

178 Wyniki badań przedstawione w pracy potwierdzają, że dzięki zastosowaniu technologii spawalniczych możliwe
 179 jest przeprowadzenie naprawy uszkodzonej aluminiowej ramy motocyklowej, co jest rozwiązaniem bardziej
 180 ekonomicznym od zakupu nowego elementu. Jednocześnie rozwiązanie to ograniczone jest do zakresu materiałów i

181 badań wykorzystanych w pracy, a prowadzenie prac naprawczych zawsze wymaga indywidualnej weryfikacji
182 instrukcji technologicznej spawania.

183 Literatura

- 184 1. G. Chomka, J. Chudy, Modelowanie konstrukcji ramy motocykla o napędzie elektrycznym, *Autobusy: technika,*
185 *eksploatacja, systemy transportowe* (2014), 15 (6), 85-88.
- 186 2. T. P. Hovorun, K. V. Berladir, V. I. Pererva, S. G. Rudenko, A. I. Martynov, Modern materials for automotive industry,
187 *Journal of Engineering Sciences* (2017), 4(2), F8-F18, DOI: 10.21272/jes.2017.4(2).f8.
- 188 3. H. Ahmad, A. A. Markina, M. V. Porotnikov, F. Ahmad, A review of carbon fiber materials in automotive industry, *IOP*
189 *Conf. Series: Materials Science and Engineering* 971 (2020), 032011, DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/032011.
- 190 4. H. Slaiman, Strength and stiffness analysis of motorcycle frame, Master's Final Degree Project, Kaunas University of
191 Technology (2018).
- 192 5. Y. Feng, X. Jun, Dynamic-characteristic analysis and improvement of 125 motorcycle body structure, *IOP Conf. Ser.:*
193 *Material Science and Engineering* (2019), 677, 032078, DOI: 10.1088/1757-899X/677/3/032078.
- 194 6. C. Rontescu, T. D. Cicic, C. G. Amza, O. Chivu, D. Dobrotă, Choosing the optimum material for making a bicycle frame,
195 *Metalurgija* (2015), 54 (4), 679-682.
- 196 7. R. Othman, N. I. Ismail, M. A. A. H. Pahmi, M. H. M. Basri, H. Sharudin, A. R. Hemdi, Application of carbon fiber
197 reinforced plastics in automotive industry: a review, *Journal of Mechanical Manufacturing* (2018), 1, 144–154.
- 198 8. B. Szczucka-Lasota, T. Węgrzyn, A. Jurek, Aluminium alloy welding in automotive industry, *Transport Problems* (2020),
199 3(15), 67-78, DOI: 10.21307/tp-2020-034.
- 200 9. J. Hirsch, Automotive trends in aluminium - the european perspective, *Materials Forum* (2004), 28, 15-23.
- 201 10. M. Olabode, P. Kah, J. Martikainen, Aluminium alloys welding processes: challenges, joint types and process selection,
202 *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (2013), 227(8), 1129-
203 1137, DOI: 10.1177/0954405413484015.
- 204 11. M. Tisza, I. Czinege, Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive
205 parts, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (2018), 4(1), 229-238, DOI:
206 10.1016/j.ijlmm.2018.09.001.
- 207 12. D. Varshney, K. Kumar, Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and
208 welding parameter optimization, *Ain Shams Engineering Journal* (2020), DOI: 10.1016/j.asej.2020.05.013.
- 209 13. Q. Zhu, H. Yu, J. Zhang, M. Li, X. Hu, Experimental study on TIG welding properties of 6061 and 7003 aluminum Alloys,
210 *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 621 (2021), 012060, DOI: 10.1088/1755-1315/621/1/012060.
- 211 14. Y. Li, W. Zou, B. Lee, A. Babkin, Y. Chang, Research progress of aluminum alloy welding technology, *The International*
212 *Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020), 109(156), DOI: 10.1007/s00170-020-05606-1.
- 213 15. K. Kumar, P. Mohan, M. Masanta, Influence of welding current on the mechanical property of 3 mm thick commercial
214 1050 aluminium butt joint weld by AC-TIG welding method, *Materials Today: Proceedings* (2018), 11(5), 24141-24146,
215 DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.208.
- 216 16. C. Berlanga-Labari, M. V. Biezma-Moraleda, P. J. Rivero, Corrosion of cast aluminum alloys: A Review, *Metals* (2020),
217 10, DOI: 10.3390/met10101384.
- 218 17. D. Loveborn, J.K. Larsson, K.-A. Persson, Weldability of aluminium alloys for automotive applications, *Physics Procedia*
219 (2017), 89, 89-99, DOI: 10.1016/j.phpro.2017.08.011.
- 220 18. Y. Liang, J. Shen, S. Hu, H. Wang, J. Pang, Effect of TIG current on microstructural and mechanical properties of 6061-T6
221 aluminium alloy joints by TIG-CMT hybrid welding, *Journal of Materials Processing Technology* (2018), 255, 161-174,
222 DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.006.
- 223 19. K.S. Pujari, D.V. Patil, G. Mewundi, Selection of GTAW process parameter and optimizing the weld pool geometry for
224 AA 7075-T6 Aluminium alloy, *Materials Today: Proceedings* (2018), 11(5), 25045-25055, DOI:
225 10.1016/j.matpr.2018.10.305.
- 226 20. S. Chen, Y. Chi, P. Zhang, Y. Shi, Mechanism to Reduce the Porosity during Argon Arc Welding of Aluminum Alloys by
27 Changing the Arc Angle, *Metals* (2020), 10(9), DOI: 10.3390/met10091121.
- 28 21. G. Rogalski, A. Świerczyńska, M. Landowski, D. Fydrych, Mechanical and microstructural characterization of TIG welded
29 dissimilar joints between 304L austenitic stainless steel and incoloy 800HT nickel alloy, *Metals* (2020), 10(5), DOI:
30 10.3390/met10050559.
- 31 22. C. Yan, C. Li, L. Wu, Q. Fu, F. Xue, Welding residual stress and distortion in ZS100 motorcycle rear fork welded joints,
32 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2018), 452, 022022, DOI: 10.1088/1757-899x/452/2/022022.
- 33 23. M. N. Faez Bin Juhari, Structural dynamic investigation of motorcycle chassis, Thesis for: Bachelor's degree of mechanical
34 engineering, Universiti Malaysia Pahang (2017).
- 35 24. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kawasaki_ZXR_750_R.jpg

- 236 25. Katalog firmy Lincoln Electric.
237 26. Katalog firmy MOST.
238 27. Katalog firmy ESAB.
239 28. I. Guzmán, E. Granda, J. Acevedo, A. Martínez, Y. Dávila, R. Velázquez, Comparative in mechanical mehavior of 6061
240 aluminum alloy welded by pulsed GMAW with different filler metals and heat treatments, *Materials* (2019), 12(24), DOI:
241 10.3390/ma12244157.
242 29. M. Ayvaz, H. Cetinel, Mechanical characteristics of AA5083: AA6013 weldment joined with AlSi12 and AlSi5 wires,
243 *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures* (2013), 41, 205–217, DOI :10.1007/978-
244 3-319-00506-5_14 .
245 30. M. Gierth, P. Henckell, Y. Ali, J. Scholl, J. P. Bergmann, Wire arc additive amanufacturing (WAAM) of aluminum alloy
246 AlMg5Mn with energy-reduced gas metal arc welding (GMAW), *Materials* (2020), 13 (12), DOI: 10.3390/ma13122671.



© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

247