



## Trwałość zmęczeniowa materiałów platerowanych metodą zgrzewania wybuchowego

GRZEGORZ KWIATKOWSKI<sup>1, 2</sup>, DARIUSZ ROZUMEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn,  
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, d.rozumek@po.opole.pl

<sup>2</sup>Zakład Technologii Wysokoenergetycznych EXPLOMET Gałka, Szulc Spółka jawna,  
ul. Oświęcimska 100H, 45-641 Opole

**Streszczenie.** W niniejszej pracy opisano porównanie trwałości zmęczeniowej na zginanie dwóch materiałów platerowanych z materiałem podstawowym. Materiałem podstawowym była stal węglowa P3335NH o grubości 10 mm, zaś materiałami platerowanymi były stale austenityczne 254SMO oraz 316L. W ramach pracy przeprowadzono badania ultradźwiękowe i badania statyczne takie jak: próba rozciągania, próba ścinania, próba zginania oraz udarność. Jako kolejne przeprowadzone zostały badania rozkładu twardości w przekroju poprzecznym próbki. Ostatnie były badania na cykliczne zginanie przy czterech różnych obciążeniach. Z przeprowadzonych badań wynika, że blachy zostały połączone na całej powierzchni z wyłączeniem technologicznych marginesów wynoszących około 30 mm na stronę oraz punktu inicjacji detonacji, który z reguły zawsze jest obszarem niezgrzanym. Badania rozkładu twardości wykazały, że proces platerowania wybuchowego spowodował wzrost twardości materiałów w pobliżu linii złącza. Z badań na cykliczne zginanie wynika, że najwyższą trwałość zmęczeniową wykazuje sam materiał podstawowy w porównaniu z materiałami platerowanymi. W przypadku każdej próbki inicjacja pęknięcia następowała w materiale podstawowym.

**Słowa kluczowe:** platerowanie wybuchowe, trwałość zmęczeniowa, zginanie, stale austenityczne

**DOI:** 10.5604/01.3001.0012.0965

### 1. Wprowadzenie

Dzięki procesowi zgrzewania wybuchowego istnieje możliwość połączenia dwóch lub więcej materiałów różniących się własnościami chemicznymi i fizycznymi. Główną zaletą zgrzewania wybuchowego jest możliwość połączenia ze sobą materiałów, których nie można połączyć innymi metodami [1, 2, 3]. Przykładem

takich materiałów może być np. stal z tytanem bądź aluminium. Proces platerowania wybuchowego polega na nałożeniu na materiał podstawowy materiału nakładanego, a następnie rozłożeniu materiału wybuchowego. W efekcie detonacji materiały zderzają się ze sobą z ogromną prędkością, co powoduje ich trwałe połączenie [4]. Proces platerowania wybuchowego powoduje silne umocnienia materiałów w pobliżu złącza, w efekcie czego powstają duże naprężenia, jak również wzrasta twardość obu materiałów w pobliżu linii złącza. Materiały platerowane stosuje się również w celu obniżenia kosztów — materiał nakładany o zdecydowanie wyższej cenie łączony jest z tańszym materiałem, np. stalą węglową. W niniejszej pracy opisano bimetale składające się z materiału podstawowego — stal węglowa P355NH — oraz materiałów nakładanych — stале austenityczne 254SMO oraz 316L. Materiał podstawowy wykorzystywany jest na elementy konstrukcji bądź całe konstrukcje, jego ważną cechą jest łatwa spawalność. Materiały nakładane, charakteryzujące się wysoką odpornością korozyjną, najczęściej znajdują zastosowanie w przemyśle petrochemicznym, farmaceutycznym, papierniczym, spożywczym, jak również przetwórstwa ropy i gazu itd. [5, 6].

Celem pracy jest porównanie trwałości zmęczeniowej bimetali uzyskanych za pomocą zgrzewania wybuchowego z trwałościami materiału podstawowego.

## 2. Metodyka badań

Proces platerowania wybuchowego przeprowadzono na blachach o wymiarach 520 × 800 mm, grubość materiału podstawowego (P355NH) wynosiła 10 mm, zaś grubość materiałów nakładanych (316L, 254SMO) 3 mm. Składy chemiczne łączonych materiałów pokazano w tabelach 1-3, zaś własności mechaniczne przed platerowaniem w tabeli 4. Zgrzewanie materiałów odbyło się w układzie równoległym według schematu przedstawionego na rysunku 1. Płyty zostały wykonane przez Zakład Technologii Wysokoenergetycznych EXPLOMET Gałka, Szulc Spółka Jawna w ramach projektu M-ERA.Net Nowe, *odporne korozyjnie materiały wytworzone metodą wybuchową dla zastosowań w instalacjach geotermalnych*.

TABELA 1

Skład chemiczny stali niestopowej P355NH [% wag.]

Materiał	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb
P355NH	0,18	0,33	1,23	0,012	0,001	0,003	0,038	0,19	0,03	0,21	0,003	0,003	0,003	0,02

TABELA 2

Skład chemiczny stali austenitycznej 254SMO [% wag.]

Materiał	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Co	N
254SMO	0,014	0,39	0,38	0,021	0,001	19,99	17,96	6,05	0,012	0,69	0,410	0,213

TABELA 3

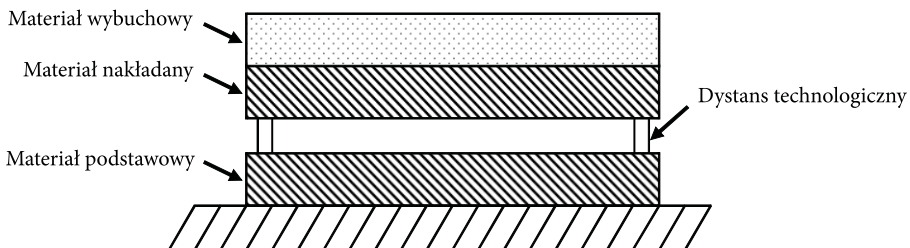
Skład chemiczny stali austenitycznej 316L [% wag.]

Materiał	C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si	Al.	B	Co
316L	0,024	16,9	1,510	2,010	0,040	10,00	0,024	0,002	0,420	0,010	0,005	0,080
	Cu	Nb	Sn									
	0,120	0,010	0,010									

TABELA 4

Własności mechaniczne badanych materiałów przed połączeniem

Materiał	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	$E$ [GPa]
P355NH	415	555	30	212
254SMO	350	690	35	200
316L	362	630	52	185

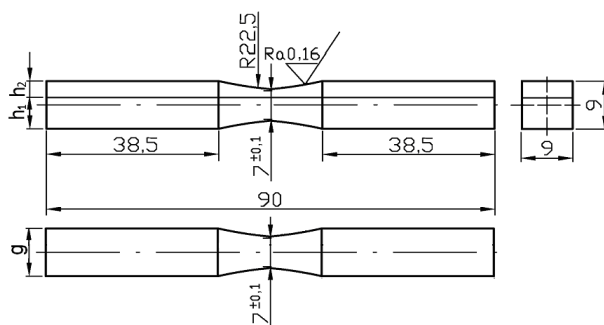


Rys. 1. Schemat układu platerowania wybuchowego

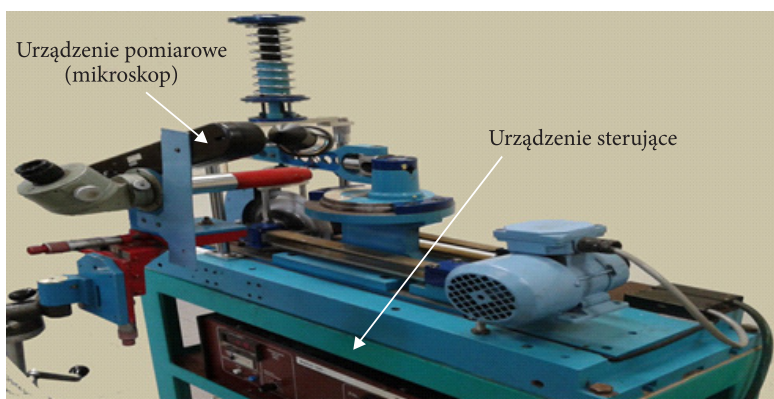
Po przeprowadzeniu procesu prostowania płyty zostały poddane badaniom ultradźwiękowym w celu określenia spójności złącza na całej powierzchni. Badania ultradźwiękowe przeprowadzono za pomocą defektoskopu Starmans electronics Ltd. Model DIO 1000-PA z podwójną głowicą, dzięki której istnieje możliwość rejestracji rozwarstwienia łączonych blach. Po wykonaniu badań ultradźwiękowych na stanowisku do cięcia strumieniowo-ściernego wycięte zostały próbki do wszystkich przeprowadzanych badań. Jako kolejne przeprowadzone zostały badania statyczne, takie jak: próba zginania, ścinania, rozciągania oraz udarność. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD-20. Szkice oraz wymiary próbek wykonano zgodnie z normą ASTM SA-264 i pokazano w pracy [7]. Jako kolejne wykonane zostały badania rozkładu twardości w przekroju poprzecznym łączonych materiałów.

Pomiary twardości wykonano na twardościomierzu INNOVATEST 4000 metodą Vickersa przy obciążeniu wglębniaka 500 g. Pomiary wykonywano w trzech różnych miejscach próbki (początek, środek i koniec próbki) w odległości co 0,2 mm od złącza zarówno w materiale podstawowym, jak i w materiale nakładanym, a następnie wyciągnięta została średnia twardość z danych pomiarów.

Jako ostatnie przeprowadzone zostały badania zmęczeniowe na zginanie. Badania wykonano w zakresie wysokiej i niskiej liczby cykli przy współczynniku asymetrii cyklu  $R = -1$  i częstotliwości obciążenia 28,4 Hz. W przypadku każdej próbki badania wykonywane były dla czterech obciążeń:  $M_a = 17,18; 19,41; 22,16; 24,5$  N·m. Badania wykonane zostały na maszynie zmęczeniowej MGZS-100 [8] będącej na wyposażeniu Politechniki Opolskiej. Maszyna umożliwia realizację przebiegów cyklicznego zginania, skręcania oraz zginania ze skręcaniem. Inicjacja i propagacja pęknięć mierzona była na bocznych powierzchniach próbek z użyciem mikroskopu optycznego o powiększeniu 25 ×, mikrometrem o dokładności 0,01 mm. Kształt i wymiary próbki przedstawiono na rysunku 2, zaś stanowisko badawcze pokazano na rysunku 3.



Rys. 2. Kształt i wymiary próbki



Rys. 3. Maszyna zmęczeniowa MZGS-100

### 3. Wyniki badań i podsumowanie

Z przeprowadzonych badań ultradźwiękowych wynika, że blachy połączone zostały na całej powierzchni z wyłączeniem tzw. marginesów technologicznych wynoszących około 30 mm na każdą stronę blachy oraz miejsca inicjacji detonacji. W przypadku badań statycznych badania przeprowadzone zostały według normy ASTM A — 264 [7], gdzie zakres wytrzymałości na rozciąganie wynosi 485-630 MPa, minimalna wytrzymałość na ścinanie to 140 MPa, zaś minimalna praca udarności wynosi 40 J. Wyniki przeprowadzonych badań statycznych pokazano w tabeli 5.

TABELA 5

Własności wytrzymałościowe po procesie platerowania wybuchowego

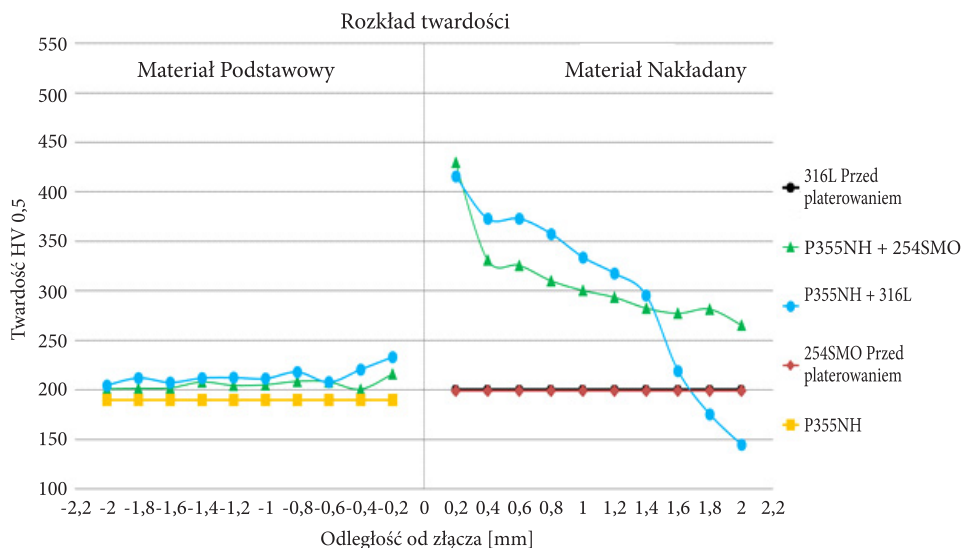
Materiał	Wytrzymałość na rozciąganie			Wytrzymałość na ścinanie	Wytrzymałość na zginanie	Udarność
	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50}$ [%]	$R_s$ [MPa]	kąt zginania 180°	Wartość średnia [J]
P355NH + 254SMO	595	667	29	601	Bez wad	52
P355NH +316L	509	658	26	602	Bez wad	60

Z przeprowadzonych badań wynika, że proces platerowania wybuchowego spowodował zdecydowany wzrost wytrzymałości na rozciąganie w porównaniu z materiałami przed platerowaniem. Według normy maksymalna wytrzymałość na rozciąganie powinna wynosić 630 MPa, z czego wynika, że bimetale wykazują zbyt dużą wytrzymałość. W przypadku badań na ścinanie w obu przypadkach wartości wytrzymałości spełniają wymogi norm, gdyż minimalna siła powinna wynosić 140 MPa.

Próba zginania wykonana została w dwóch wariantach. W pierwszym rozciągany był materiał nakładany, a materiał podstawowy ściskany, zaś w drugim przypadku było na odwrót, materiał nakładany był ściskany, a materiał podstawowy rozciągany. W obu przypadkach zgięcie materiałów do 180° nie spowodowało żadnych rozwarstwień ani pęknięć.

Próba udarności została przeprowadzona na trzech próbach, a następnie wyciągnięto średnią wartość. W obu przypadkach wyniki spełniały wymogi normy, według której minimalna praca powinna być równa 40 J.

Jako kolejne zostały przeprowadzone badania rozkładu twardości, a wyniki pokazano na rysunku 4. Z przedstawionych pomiarów wynika, że proces platerowania wybuchowego spowodował zdecydowany wzrost twardości łączonych materiałów w pobliżu linii złącza [9]. Bimetal, w którym materiałem nakładanym jest stal austenityczna 254SMO, w pobliżu złącza wykazuje najwyższą wartość twardości i wynosi ona 429 HV. Wynik ten może być spowodowany silnym umocnieniem

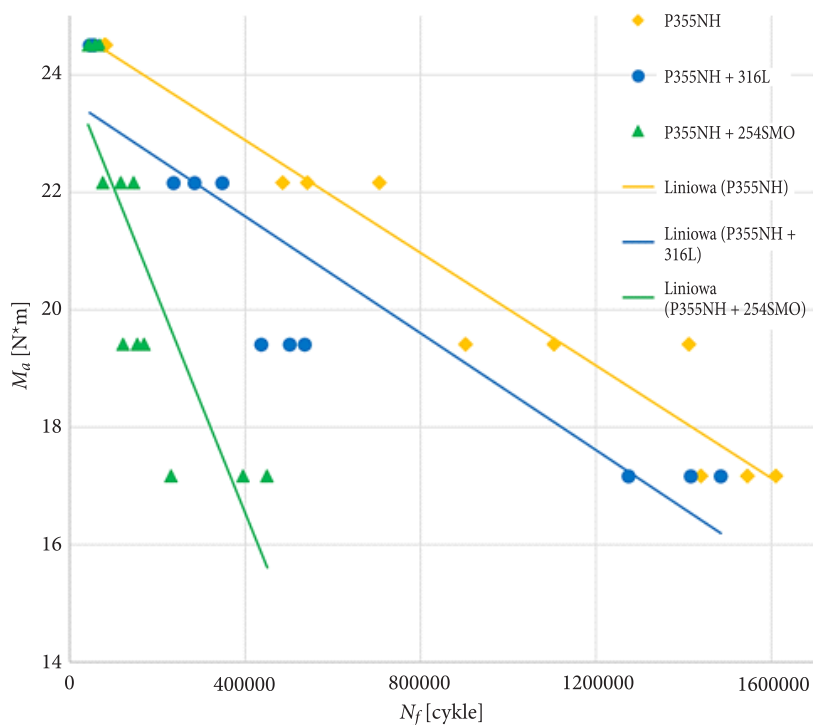


Rys. 4. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym badanych złączy

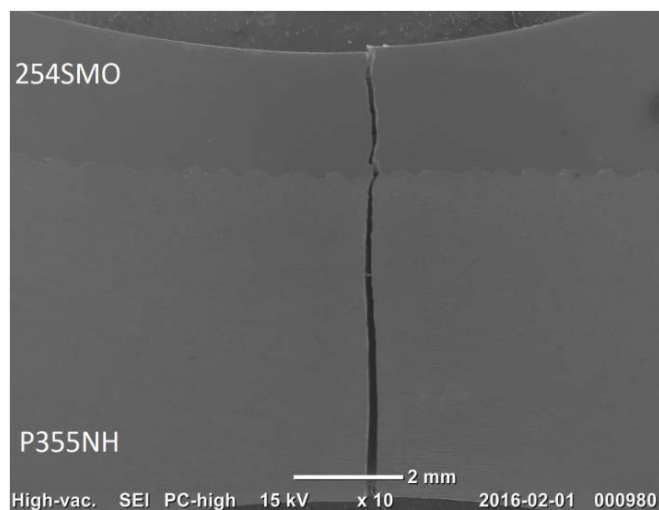
materiału bądź wykonaniem pomiaru w obszarze przetopionym. Oddalając się od złącza w przypadku obu materiałów platerowanych, twardość zdecydowanie spada. W przypadku materiału podstawowego widoczny jest nieznaczny wzrost twardości w stosunku do materiału przed platerowaniem. Najwyższą wartość twardości w materiale podstawowym odnotowano w bimetalu z materiałem nakładanym 316L i wynosiła ona 233 HV.

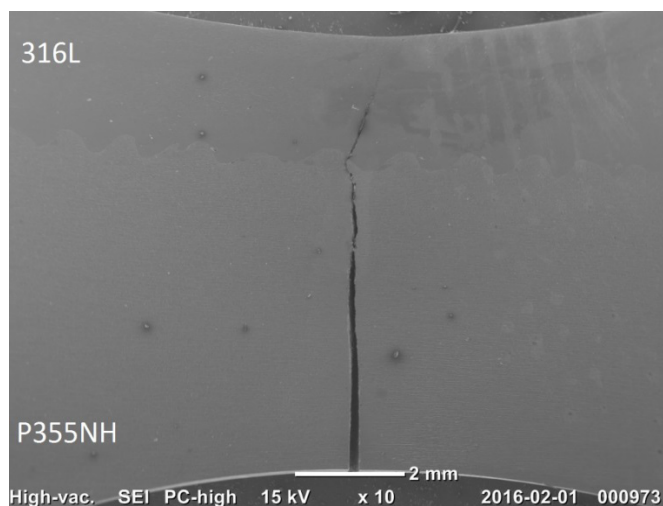
Jako ostatnie przeprowadzone zostały badania na cykliczne zginanie (rys. 5). Badania wykonano dla samego materiału podstawowego, jak i dla materiałów platerowanych. W przypadku każdego materiału i każdego obciążenia wykonane zostały trzy próby, z których następnie wyciągnięta została średnia wartość trwałości zmęczeniowej.

Z przeprowadzonych badań wynika, że dla ustalonych obciążeń najwyższą trwałość zmęczeniową wykazał materiał podstawowy. Natomiast najniższą trwałość zmęczeniową wykazał bimetale, w którym materiałem nakładanym był 254SMO. Przykładowo, porównując obciążenia dla 19,41 N·m, inicjacja pęknięcia nastąpiła w materiale podstawowym przy 147 000 liczbach cykli, następnie pęknięcie propagowało w materiał nakładany i uszkodziło złącze przy 158 000 liczbach cykli, co pokazano na rysunku 6. W przypadku plateru, w którym materiałem nakładanym jest stal austenityczna 316L (rys. 7), inicjacja pęknięcia nastąpiła również w materiale podstawowym i propagowała w stronę materiału nakładanego. Inicjacja pęknięcia nastąpiła po 490 000 liczbach cykli, zaś pęknięcie dotarło do złącza po 520 000 liczbach cykli.



Rys. 5. Wykresy amplitud momentu zginającego w funkcji trwałości próbek

Rys. 6. Rozwój ścieżki pęknięcia przy obciążeniu momentem gnącym  $M_a = 19,41$  N·m w platerze P355NH + 254SMO



Rys. 7. Rozwój ścieżki pęknięcia przy obciążeniu momentem gnącym  $M_a = 19,41$  N·m plateru P355NH + 316L

Wyniki badań zmęczeniowych zostały poddane obliczeniom statystycznym według zależności [10]:

$$\log N_f = A + m \cdot M_a^x, \quad (1)$$

gdzie:  $M_a$  — amplituda momentu;  
 $N_f$  — liczba cykli do zniszczenia;  
 $A$  i  $m$  — współczynniki równania regresji.

Współczynniki równania regresji i korelacji zostały przedstawione w tabeli 6.

TABELA 6

Współczynniki równania regresji i korelacji na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$

Materiał	$A$	$m$	$r$
P355NH	9,204	-0,167	0,923
P355NH+316L	9,333	-0,184	0,967
P355NH+254SMO	7,235	-0,102	0,922

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- proces platerowania wybuchowego spowodował wzrost twardości zarówno w materiale podstawowym, jak i w materiale nakładanym,



- we wszystkich próbkach inicjacja pęknięcia wystąpiła w materiale podstawowym i najwyższą trwałość wykazał również materiał podstawowy,
- wyższą trwałością charakteryzował się bimetal P355NH+316L w porównaniu z bimetalem P355NH+254SMO, pomimo że w obu przypadkach mamy do czynienia z nakładanymi materiałami austenitycznymi,
- przy najwyższym obciążeniu trwałość wszystkich materiałów miała zbliżone wartości.

Praca jest finansowana z projektu NCBiR i częściowo z działalności statutowej uczelni.

Praca powstała z wykorzystaniem części badań prowadzonych w ramach programu M-Era.net „Nowe, odporne korozyjnie materiały wytworzone metodą wybuchową dla zastosowań w instalacjach geotermalnych”; współfinansowany ze środków NCBiR decyzją numer DZP/M-ERA.NET-2013/2309/2014.

Artykuł opracowano na podstawie referatu wygłoszonego na XVI Krajowej Konferencji Mechaniki Pękania w Pułtusk, 12-15.09.2017 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.11.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 25.04.2018 r.

#### LITERATURA

- [1] CROSSLAND B., *Explosive welding of metals and its application*, Claredon Press, Oxford, 1982.
- [2] WALCZAK W., *Zgrzewanie wybuchowe metali*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1989.
- [3] KAROLCZUK A., KOWALSKI M., BAŃSKI R., ZOK F., *Fatigue phenomena in explosively welded steel-titanium clad components subjected to push-pull loading*, Int. J. Fatigue, 48, 2013, pp. 101-108.
- [4] SZACHOGLUCHOWICZ I., SNIJEK L., HUTSAYLYUK V., *Low cycle fatigue properties of AA2519-Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding*, Eng. Fail. Anal., 69, 2016, pp. 77-87.
- [5] YAKUP KAYA, NIZAMETTIN KAHRAMAN, *An investigation into the explosive welding/cladding of Grade A ship steel/AISI 316L austenitic stainless steel*, Materials & Design, 52, 2013, pp. 367-372.
- [6] PAUL H., LITYŃSKA-DOBRYŃSKA L., PRAŻMOWSKI M., *Microstructure and phase constitution near the Interface of explosively welded aluminium/copper plates*, Metall. Mater. Trans., 44A, 2013, pp. 3836-3851.
- [7] ASTM A-264-03, Standard Specification for Stainless Chromium-Nickel Steel-Clad Plate.
- [8] KWIATKOWSKI G., ROZUMEK D., *The effect of heat treatment parameters on the structure and fatigue cracks growth in steel-titanium bimetal*, Inżynieria Materiałowa/Materials engineering, 2, 2016.
- [9] KWIATKOWSKI G., ROZUMEK D., *Własności statyczne różnych materiałów zgrzewanych wybuchowo*, Przegląd Mechaniczny, 6, 2016, s. 21-27.
- [10] ASTM E 739-91, *Standard practice for statistical analysis of linearized stress-life (S-N) and strain-life fatigue data*, [in:] Annual Book of ASTM Standards, vol. 03,01, Philadelphia, 1999, pp. 614-620.

## G. KWIATKOWSKI, D. ROZUMEK

**Fatigue life of materials clad with the method of explosive welding**

**Abstract.** This paper describes the comparison of fatigue life on bending of two clad materials with the base material. The base material was the carbon steel P3335NH of the thickness of 10 mm and the clad materials was austenitic steels 254SMO and 316L. As a part of the work, ultrasonic testing of static tests such as tensile tests, shear tests, bending tests and impact tests were performed. The hardness distribution tests in the cross-section of the sample was subsequently carried out. Last tests were the cyclic bending tests at four different loads. Surveys show that the plates are connected to the entire surface with the exclusion of technological margins of approximately 30 mm per side and the detonation initiation point, which, as a rule, is always a non-connected area. Hardness distribution tests shown that the explosive plating process has resulted in an increase in the hardness of materials near the joint line. The bending studies show that the highest fatigue life is the same as the base material compared to the cladding materials. For each sample, the crack initiation always started in the base material.

**Keywords:** explosive welding, fatigue life, bending, austenitic steels

**DOI:** 10.5604/01.3001.0012.0965