

# Wpływ wyżarzania normalizującego na rozwój pęknięć zmęczeniowych oraz właściwości materiałów platerowanych stopami niklu

Effect of normalization annealing on the fatigue cracks growth and properties for clad materials with nickel alloys

## Streszczenie

W pracy opisano rozwój pęknięć zmęczeniowych dla dwóch różnych materiałów zgrzewanych wybuchowo. W obu przypadkach wykorzystano jednakowy materiał podstawowy – stal niestopowa P355NH zaś materiałami nakładanymi są stopy niklu alloy 625 i C-276. Przeprowadzono badania zmęczeniowe przy cyklicznym zginaniu i współczynniku asymetrii cyklu wynoszącym  $R = -1$  oraz amplitudzie momentu  $M_a = 19.41 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Rozwój pęknięć zmęczeniowych mierzony był przy pomocy przenośnego mikroskopu o powiększeniu 25x znajdującego się przy maszynie zmęczeniowej MZGS-100. W pracy przedstawiono również wyniki badań statycznych oraz badania rozkładu twardości na przekroju poprzecznym bimetalu przed i po obróbce cieplnej.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie wybuchowe; wyżarzanie normalizujące; pęknięcia zmęczeniowe; zginanie; twardość; stopy niklu

## Abstract

The work describes the development of fatigue cracks for two different materials by explosive welding. In both cases, was used the same base material carbon steel - P355NH and clad materials are nickel alloys 625 and C-276. Fatigue tests were carried out at cyclic bending with stress ratio  $R = -1$  and amplitude of the moment  $M_a = 19.41 \text{ N}\cdot\text{m}$ . The fatigue cracks growth was measured by a 25x magnification microscope located at the fatigue test stand MZGS-100. The paper also presents the study of strength tests and hardness distribution in bimetal cross section before and after heat treatment.

**Keywords:** explosive welding; normalization annealing; fatigue cracks fatigue; bending; hardness; nickel alloys

## Wstęp

Proces platerowania wybuchowego pozwala na połączenie dwóch lub więcej materiałów, których nie da połączyć się żadną inną metodą. Przykładami takich bimetalu są stal z aluminium, bądź tytan z aluminium. Sam proces platerowania wybuchowego polega na nałożeniu na materiał podstawowy dystansów technologicznych, na których następnie ułożony zostaje materiał nakładany, po czym na niego nałożony zostaje materiał wybuchowy w postaci sproszkowanego materiału wybuchowego na bazie saletry amonowej. W wyniku detonacji materiały zderzają się ze sobą z dużą prędkością w skutek czego następuje ich trwałe połączenie [1,2]. Proces zgrzewania wybuchowego powoduje silne umocnienie obu materiałów, szczególnie w strefie złącza [3].

W celu zmniejszenia bądź zniwelowania umocnienia oraz występujących naprężeń stosuje się procesy obróbki cieplnej, więcej na ten temat można znaleźć w pracach [4÷7].

Materiały platerowane wykorzystywane są w celu obniżenia kosztów, gdzie przeważnie materiał podstawowy jest stosunkowo tani (np. stal niestopowa) w stosunku do materiału nakładanego np. tytanu. Badania zmęczeniowe pozwalają określić trwałość przy cyklicznym zginaniu, gdyż większość z materiałów pracuje w warunkach oddziaływania obciążeń zmiennych w czasie [6,8,9]

Celem niniejszej pracy są badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych plateru typu stal niestopowa – stopy niklu po obróbce cieplnej.

Mgr inż. Grzegorz Kwiatkowski; dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. nzw. PO – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: grzesiekk1989@gmail.com

## Metodyka badań

Badaniom poddane zostały platory wykonane za pomocą zgrzewania wybuchowego (nr procesu 441 wg PN-EN ISO 4063) przez Zakład Technologii Wysokoenergetycznych EXPLOMET Gałka, Szulc Spółka jawna, gdzie materiałem podstawowym była stal niestopowa P355NH o grubości 10 mm, zaś materiałami nakładanymi były stopy niklu C-276 i alloy 625 o grubości 3 mm. Jako pierwsze przeprowadzone zostały badania nieniszczące, ultradźwiękowe w celu sprawdzenia spójności złącza na całej badanej powierzchni. Badania ultradźwiękowe wykonano za pomocą defektoskopu Starmans electronics Ltd. Model DIO 1000-PA wraz z podwójną głowicą, dzięki której możliwa była detekcja i rejestracja rozwarstwień łączonych blach, jak również wad (nieciągłości) oraz pęknięć w materiałach składowych. Badania wykonano zgodnie z wymaganiami normy EN 578/578M Level B [10]. Następnie przeprowadzona została obróbka cieplna polegająca na wyżarzaniu normalizującym. Parametry obróbki cieplnej dobrano na podstawie własnych doświadczeń i pokazano w tablicy I.

Jako kolejne przeprowadzone zostały badania wytrzymałościowe takie jak: statyczna próba rozciągania, próba zginania, próba ścinania oraz udarność. W przypadku próby udarności wykonane zostały 3 próby, z których następnie wyciągnięta została średnia wartość. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej ZD-20, wg normy amerykańskiej ASTM A-265 [11]. Wszystkie badania zostały wykonane zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi tj.: statyczna próba rozciągania – norma ASTM SA-370 [12] próba zginania – norma ASTM SA-265, próba ścinania norma ASTM SA-265, badania udarności – norma ASTM SA-370. Własności mechaniczne przed obróbką cieplną pokazano w tablicy II.

Następnie wykonane zostały badania twardości na przekroju poprzecznym próbki. Badania wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 0,5 kg HV. Pomiar wykonywano co 0,2 mm w materiale podstawowym oraz nakładanym na długości 2 mm od linii złącza. Jako ostatnie przeprowadzone zostały badania zmęczeniowe przy zginaniu. Badania wykonano na maszynie zmęczeniowej MZGS 100 w zakresie

wysokiej oraz niskiej liczby cykli przy stałym obciążeniu  $M_a = 19,41 \text{ N}\cdot\text{m}$  oraz częstotliwości obciążenia 28,4 Hz. Inicjacja oraz propagacja pęknięć mierzona była za pomocą przenośnego mikroskopu optycznego o powiększeniu 25x i mikrometru znajdującego się przy maszynie zmęczeniowej z dokładnością 0,01 mm. Obserwacja prowadzona była na bocznych powierzchniach próbki przy jednoczesnym rejestrowaniu bieżącej liczby cykli obciążenia N. Pęknięcia mierzone były do momentu przecięcia złącza pomiędzy materiałem podstawowym i nakładanym bądź do zniszczenia próbki.

## Wyniki badań i ich analiza

Badania ultradźwiękowe wykazały, że blachy połączone są na całej powierzchni z wyjątkiem technologicznych marginesów wynoszących ok. 30 mm na każdą stronę oraz miejscem pobudzenia detonacji, które zazwyczaj jest obszarem niezgrzanym.

Badania wytrzymałościowe wykazały, że obróbka cieplna w znacznym stopniu obniża własności wytrzymałościowe platerów (wyniki pokazano w tabl. III).

W przypadku próby na rozciąganie wytrzymałość po platerowaniu kryterium akceptacji odnosi się do wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , natomiast  $R_e$ ,  $A_{50}$  podano jako dodatkową informację. W przypadku plateru, gdzie materiałem nakładanym jest alloy 625  $R_m = 698 \text{ MPa}$ , zaś dla C-276 wytrzymałość na rozciąganie równa jest 649 MPa co zdecydowanie przekracza założenia normy ASTM A-265, wg której zakres wytrzymałości na rozciąganie wynosi od 485÷620 MPa. Obróbka cieplna wpłynęła na obniżenie wytrzymałości na rozciąganie obydwu materiałów, co pokazano w tablicy III. Badania na ścinanie wykonane zostały według normy ASTM SA-265, gdzie minimalna wymagana siła do spełnienia akceptacji wynosi 140 MPa. Zastosowanie obróbki cieplnej powoduje spadek wytrzymałości, jednak w przypadku obróbki cieplnej jak i jej braku wyniki spełniają wymagania normy ASTM SA-265. Próba na zginanie wykonana została zgodnie

Tablica I. Parametry obróbki cieplnej

Table I. Heat treatment parameters

Rodzaj obróbki cieplnej	Nagrzewanie		Wyrzwanie		Chłodzenie
	Wkładanie materiału do pieca przy temperaturze, °C	Prędkość nagrzewania, °C/h	Temperatura, °C	Czas, min	Sposób chłodzenia
Wyżarzanie normalizujące	300	150	910	30	W swobodnym powietrzu do temperatury otoczenia

Tablica II. Własności mechaniczne badanych materiałów po połączeniu

Table II. Mechanical properties of materials after cladding

Materiał	Własności wytrzymałościowe			Wytrzymałość na ścinanie	Próba zginania	Praca łamania
	$R_e$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_{50}$ , %	$R_s$ , MPa	kąt zginania 180°	Wartość średnia, J
P355NH + alloy 625 (1)	608	698	29	611	Bez nieciągłości	118
P355NH + C-276 (2)	587	649	31	594	Bez nieciągłości	49

Tablica III. Własności mechaniczne badanych materiałów po obróbce cieplnej  
Table III. Mechanical properties of tested materials after heat treatment

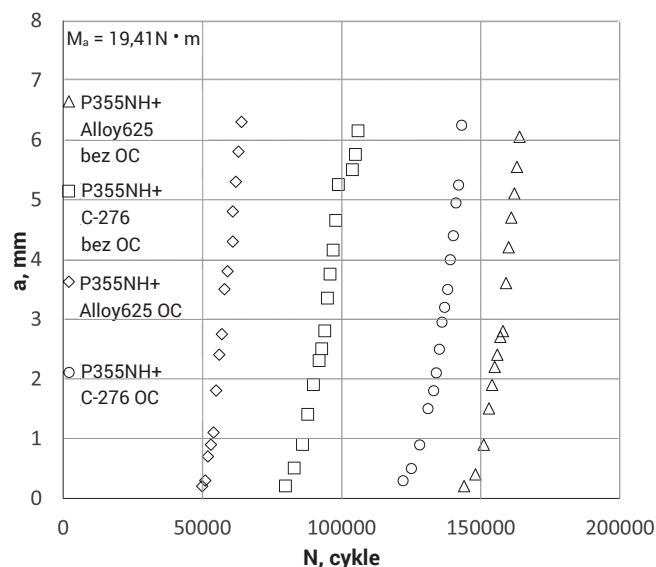
Materiał	Własności wytrzymałościowe			Wytrzymałość na ścinanie	Próba zginania	Praca łamania
	R <sub>e</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>50</sub> , %	R <sub>s</sub> , MPa	kąt zginania 180°	Wartość średnia, J
P355NH + alloy 625 (3)	364	600	45	405	Bez nieciągłości	30
P355NH + C-276 (4)	358	583	37	470	Bez nieciągłości	102

z normą ASTM SA-265 w dwóch wariantach. W pierwszym materiał nakładany był rozciągany, a materiał podstawowy ściskany zaś w drugim odwrotnie. W obu przypadkach materiały nie uległy rozwarstwieniu, co daje podstawę do stwierdzenia, że charakteryzują się bardzo dobrą jakością.

Dla badań udarności minimalna praca łamania wg normy ASTM SA-370 wynosi 27 J. Z tablicy III wynika, że oba plateru spełniają kryteria akceptacji.

### Badania zmęczenia

W przypadku badań zmęczeniowych na zginanie, propagacja pęknięć obserwowana była za pomocą przenośnego mikroskopu. Przykładowe wyniki wzrostu pęknięć w funkcji liczby cykli przedstawiono na rysunku 1.

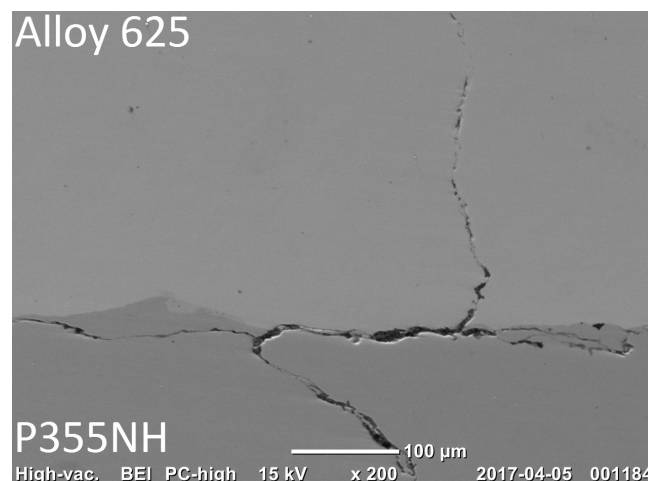


Rys. 1. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli  
Fig. 1. Cracks length vs. number of cycles

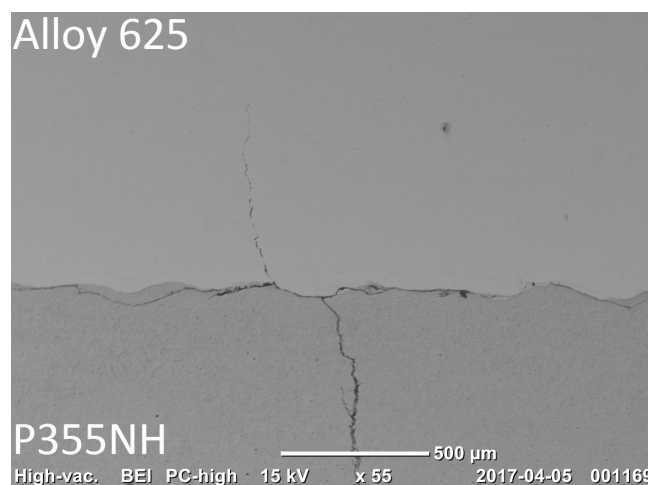
Z rysunku 1 wynika, że największą trwałość zmęczeniową wykazuje plater ze stopem niklu alloy 625 bez obróbki cieplnej, a jego trwałość wynosi  $N_f = 164000$  cykli. Inicjacja pęknięcia nastąpiła przy 144000 cyklach w materiale podstawowym, po czym pęknięcie propagowało w stronę materiału nakładanego. Pęknięcie dotarło do złącza przy 162000 cyklach, gdzie nastąpiło jego rozwarstwienie. Następnie obserwowano dalszą propagację w stronę materiału nakładanego (rys. 2).

W przypadku tego plateru (materiał nakładany alloy 625) obróbka cieplna spowodowała zdecydowany spadek trwałości zmęczeniowej do wartości  $N_f = 64000$  cykli. Podobnie jak w przypadku próbki bez obróbki cieplnej inicjacja pęknięcia

nastąpiła w materiale podstawowym. Inicjacja rozpoczynała się przy 50000 cyklach i propagowała w stronę materiału nakładanego (rys. 3). Pęknięcie dotarło do złącza przy 63000 cyklach i przecinając linię złącza propagowało w materiale nakładanym. Plater, z materiałem nakładanym typu stop niklu C-276 wykazuje zdecydowanie niższą trwałość zmęczeniową w porównaniu do plateru z alloy 625 bez obróbki cieplnej. Inicjacja pęknięcia również nastąpiła w materiale podstawowym przy 80000 cyklach i pęknięcie propagowało w stronę materiału nakładanego.

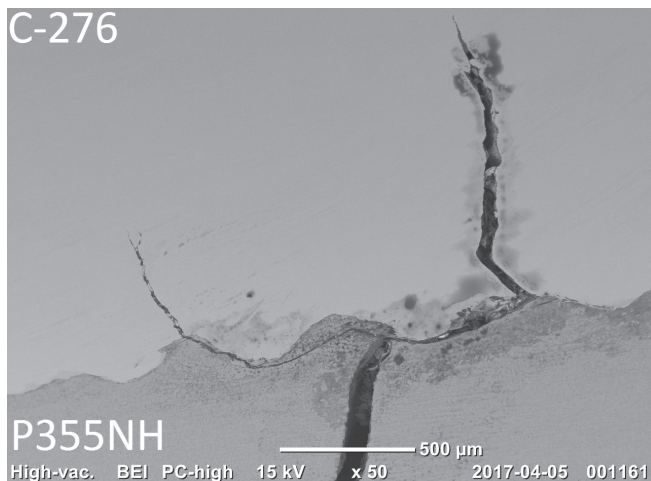


Rys. 2. Pęknięcie próbki oraz strefa złącza P355NH + alloy 625 bez obróbki cieplnej  
Fig. 2. Crack specimen and area of joint P355NH + alloy 625 without heat treatment



Rys. 3. Pęknięcie próbki oraz strefa złącza P355NH + alloy 625 po obróbce cieplnej  
Fig. 3. Crack specimen and area of joint P355NH + Alloy 625 after heat treatment

Pęknięcie dotarło do złącza przy 104000 cyklach i przecięło linię złącza (rys. 4), a następnie propagowało w materiale nakładanym w podobny sposób jak w materiale podstawowym. Trwałość zmęczeniowa próbki wynosi  $N_f = 106000$  cykli. W przypadku bimetalu, gdzie materiałem nakładanym jest stop niklu C-276 obróbka cieplna spowodowała wzrost trwałości zmęczeniowej do  $N_f = 143000$  cykli, a pęknięcie dotarło do złącza przy 141000 cyklach. Jednakże w porównaniu do pozostałych badanych platerów pęknięcie nie przecięło złącza lecz nastąpił rozwój pęknięcia w złączu przy jednoczesnej inicjacji i propagacji pęknięcia w materiale nakładanym (rys. 5).



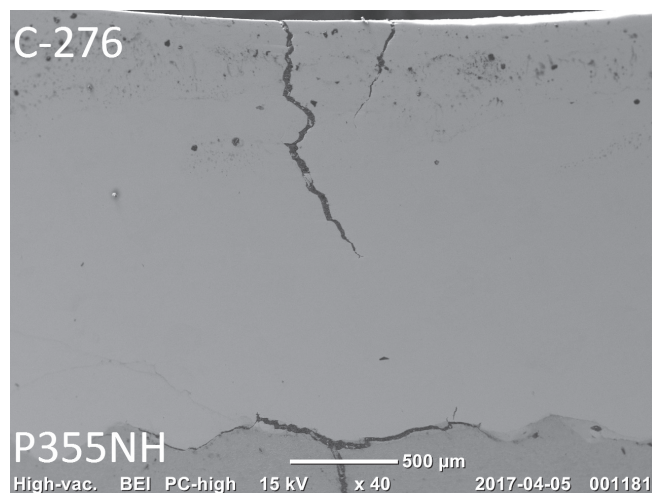
Rys. 4. Pęknięcie próbki oraz strefa złącza P355NH + C-276 bez obróbki cieplnej

Fig. 4. Crack specimen and area of joint P355NH + C-276 without heat treatment

#### Badania pomiarów twardości

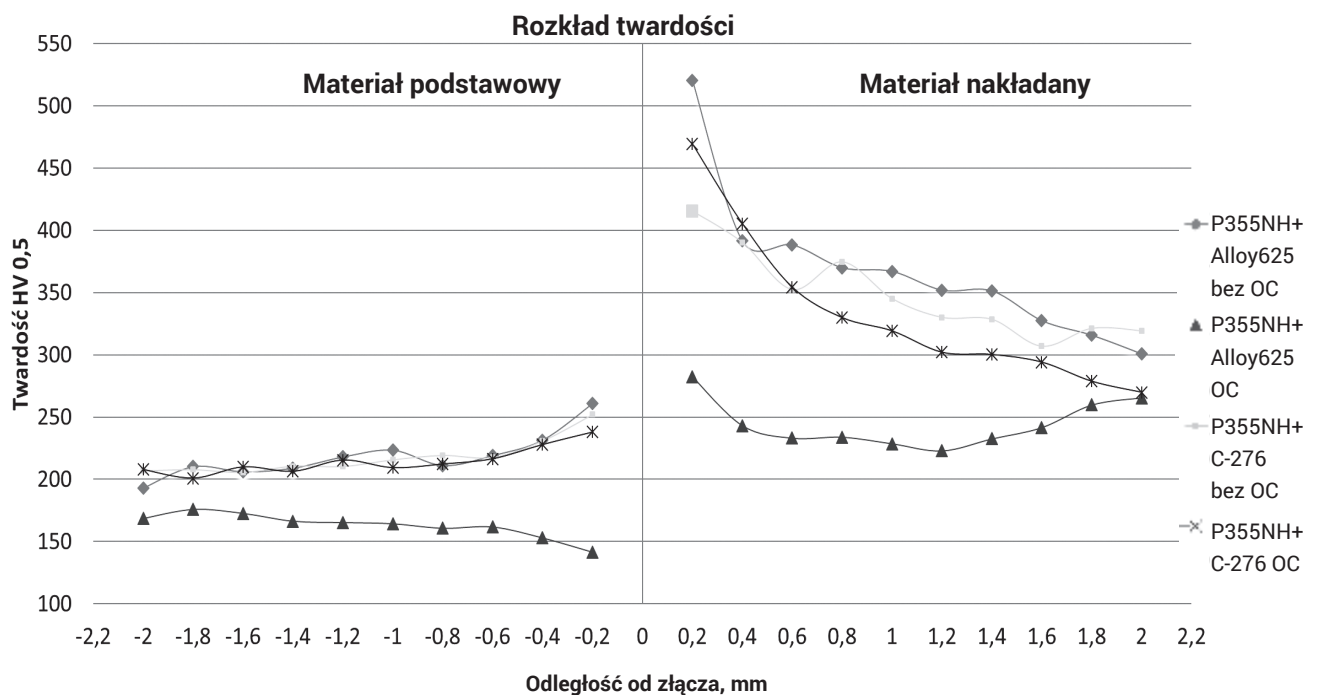
Na każdej próbce, w przekroju poprzecznym, wykonywane były pomiary w trzech różnych miejscach próbki, a następnie wyliczana była średnia wartość dla trzech różnych pomiarów i danej odległości od złącza. Wyniki rozkładu

twardości pokazano na rysunku 6. Z przeprowadzonych badań wynika, że największe wartości twardości występują w pobliżu złącza. Może to być spowodowane umocnieniem występującym w procesie platerowania wybuchowego bądź pomiar wykonany został w miejscu przetopienia (obszaru intermetalicznego) charakteryzującego się wysoką twardością. W przypadku plateru, gdzie materiałem nakładanym jest alloy 625, obróbka cieplna spowodowała zdecydowany spadek twardości na przekroju materiału podstawowego i nakładanego. Bimetal z materiałem nakładanym C-276 wykazuje niższą twardość bez obróbki cieplnej w porównaniu do alloy 625. Jednakże w przypadku tego plateru (C-276) obróbka cieplna powoduje wzrost twardości materiału nakładanego w odległości do 0,6 mm od linii złącza w stosunku do tego materiału bez obróbki cieplnej.



Rys. 5. Pęknięcie próbki oraz strefa złącza P355NH + C-276 po obróbce cieplnej

Fig. 5. Crack specimen and area of joint P355NH + C-276 after heat treatment



Rys. 6. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym badanych złączy

Fig. 6. Hardness distribution in cross-section of tested joints

---

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Badania zmęczeniowe wykazują, że obróbka cieplna powoduje wzrost trwałości zmęczeniowej dla bimetalu z materiałem nakładanym C-276, zaś spadek trwałości w bimetalu z alloy 625.
2. Obróbka cieplna powoduje obniżenie własności wytrzymałościowych badanych platerów.
3. W przypadku bimetalu, gdzie materiałem nakładanym jest stop niklu C-276 obróbka cieplna powoduje wzrost twardości w stosunku do tego materiału bez obróbki cieplnej w zakresie  $0 \pm 0,6$  mm odległości od linii złącza.
4. We wszystkich próbkach inicjacja pęknięcia nastąpiła w materiale podstawowym.

## Literatura

- [1] Crossland B.: Explosive welding of metals and its application, Clarendon Press, Oxford, 1982.
- [2] Walczak W.: Zgrzewanie wybuchowe metali, Warszawa, WNT, 1989.
- [3] Rogalski, D. Fydrych, W. Walczak: Zastosowanie zgrzewania wybuchowego do wytwarzania kompozytów metalowych z osnową aluminiową, Przegląd Spawalnictwa vol. 85, nr 5, 2013.
- [4] U. Sobczak, M. Najwer, G. Kwiatkowski: Wpływ obróbki cieplnej na mikrostrukturę i odporność korozyjną bimetalu stal 904L – nikiel N02201 wytworzonego zgrzewaniem wybuchowym, Przegląd Spawalnictwa vol. 88, nr 7, 2016.
- [5] A. Pocica, M. Najwer: Obróbka cieplna zgrzewanych wybuchowo bimetalu ze stali austenitycznych, Przegląd Spawalnictwa, vol. 86, nr 5, 2014.
- [6] Kwiatkowski G., Rozumek D.: Rozwój pęknięć przy cyklicznym zginaniu dla różnych materiałów platerowanych wybuchowo, Przegląd Spawalnictwa, vol. 88, nr 4, 2016.
- [7] Natalia Pocica, Lechosław Tuz: Ocena mikrostruktury i wybranych własności mechanicznych złączy zgrzewanych wybuchowo po obróbce cieplnej, Przegląd Spawalnictwa, vol. 88, nr 4, 2016.
- [8] Rozumek D., Macha E.: Opis rozwoju pęknięć zmęczeniowych w materiałach sprężysto-plastycznych przy proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem, Politechnika Opolska, Opole 2006.
- [9] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, Warszawa, PWN, 1997.
- [10] EN 578/578M Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications.
- [11] ASTM A-265-12 Standard Specification for Stainless Chromium-Nickel Steel-Clad Plate.
- [12] ASTM A370-09 Test Method and Definition for Mechanical Testing.