

Wpływ wyżarzania normalizującego na własności statyczne i zmęczeniowe materiałów platerowanych do zastosowań w instalacjach geotermalnych

The effect of stress normalizing annealing on the static and fatigue properties of clad materials for applications in geothermal installations

Streszczenie

W pracy porównano własności statyczne oraz zmęczeniowe materiałów platerowanych przed oraz po obróbce cieplnej. We wszystkich przypadkach zastosowano jednakowy materiał podstawowy – stal niestopową P355NH, zaś materiałami nakładanymi były stale austenityczne: 254SMO, 316L, stopy niklu: C-276, Alloy 625 oraz superduplex SAF2507. W ramach pracy przeprowadzono obróbkę cieplną w temperaturze 910 °C, a następnie wykonano badania statyczne (próba zginania, ścinania, rozciągania), badanie udarności, rozkładu twardości w przekroju próbki oraz badania na cykliczne zginanie.

Słowa kluczowe: zgrzewanie wybuchowe; zmęczenie; zginanie; materiały platerowane

Abstract

This paper describe the comparison of static and fatigue properties of clad materials before and after heat treatment. In all cases was used the same base material – P355NH carbon steel and the clad materials was: 254SMO and 316L austenitic steels, C-276 and alloy 625 nickel alloys, as well as SAF2507 super-duplex. As part of the work, heat treatment was carried out at 910 °C and then static tests (bend test, shear test, tensile test) impact test, hardness distribution tests in the specimen cross-section and cyclic bending were performed.

Keywords: explosive welding; fatigue; bending; clad materials

Wstęp

Dzięki procesowi zgrzewania wybuchowego istnieje możliwość połączenia ze sobą dwóch lub więcej metali [1]. Istotną zaletą tej technologii jest możliwość łączenia ze sobą materiałów o bardzo dużych, jak również małych powierzchniach. Metoda ta umożliwia również połączenie ze sobą metali, których nie da się połączyć innymi metodami. Przykładami takich kompozytów mogą być tytan z aluminium bądź stal z aluminium. Sam proces platerowania polega na zderzeniu ze sobą z ogromną prędkością różnych materiałów pod wpływem detonacji materiału wybuchowego znajdującego się na powierzchni materiału nakładanego [2]. W wyniku zderzenia obu materiałów w pobliżu strefy złącza powstają silne umocnienia. W celu ich usunięcia bądź zmniejszenia można zastosować obróbkę cieplną. W głównej mierze materiały platerowane stosowane są ze względów ekonomicznych, ponieważ w większości przypadków materiał nakładany jest stosunkowo drogi w porównaniu z materiałem podstawowym. Badania własności mechanicznych pozwalają na

przedstawienie zmian wytrzymałościowych badanych materiałów przed i po obróbce cieplnej.

Celem niniejszej pracy jest porównanie własności statycznych i zmęczeniowych materiałów platerowanych przed oraz po wykonaniu wyżarzania normalizującego.

Metodyka badań

W ramach pracy badaniom poddane zostały materiały platerowane wykonane za pomocą technologii zgrzewania wybuchowego przez Zakład Technologii Wysokoenergetycznych EXPLOMET Gałka, Szulc Spółka Jawna, gdzie bazowym materiałem jest stal niestopowa P355NH o grubości 10 mm, zaś materiałami nakładanymi są stale austenityczne (254SMO, 316L), stopy niklu (C-276, alloy 625), oraz superduplex SAF2507 o grubości 3 mm. Po przeprowadzeniu procesu zgrzewania wybuchowego płyty zostały wyprostowane

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

Autor korespondencyjny/Corresponding author: grzesiekk1989@gmail.com

Tablica I. Parametry obróbki cieplnej
Table I. Heat treatment parameters

| | Nagrzewanie | | Wyrzewanie | | 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 powietrzu |

za pomocą prasy, następnie wykonane zostały badania nieniszczące ultradźwiękowe, dzięki którym istnieje możliwość sprawdzenia spójności złącza na całej łączonej powierzchni. Badania ultradźwiękowe wykonane zostały defektoskopem Starmans Electronics Ltd. Model DIO 1000-PA z podwójną głowicą. Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie obróbki cieplnej, a dokładniej wyżarzania normalizującego. Obróbkę cieplną wykonano w piecu Czylok FCF-V120HC, a parametry obróbki cieplnej pokazano w tablicy I.

Wykonano badania statyczne takie jak: próba rozciągania, zginania, ścinania a także badanie udarności. Kształt próbek do badań statycznych pokazano w pracy [3]. Badania przeprowadzone zostały na maszynie wytrzymałościowej ZD-20, wg norm amerykańskich: dla stali austenitycznych oraz super-duplexu ASTM A-264 [4], a dla stopów niklu ASTM A-265 [5]. Własności mechaniczne przed obróbką cieplną pokazano w tablicy II.

Po przeprowadzeniu badań statycznych jako kolejne wykonano badania rozkładu twardości na przekroju poprzecznym próbki. Wszystkie pomiary wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 500 g co 0,2 mm od złącza do powierzchni obydwu materiałów. Schemat przeprowadzania badań można znaleźć w [3]. Jako ostatnie wykonane zostały badania zmęczeniowe na zginanie. Badanie przeprowadzone zostało na maszynie zmęczeniowej MZGS 100 [6] w zakresie niskiej jak i wysokiej liczby cykli przy amplitudzie obciążenia wynoszącej $M_a = 19,41 \text{ N}\cdot\text{m}$, współczynnika asymetrii

cyklu $R = -1$ i częstotliwości obciążenia 28,4 Hz. Propagacja pęknięcia mierzona była za pomocą mikrometru umieszczonego w przenośnym mikroskopie optycznym o powiększeniu 25x. Pomiar długości pęknięcia następował od miejsca inicjacji pęknięcia do przecięcia złącza bądź do pełnego zniszczenia próbki przy jednoczesnym notowaniu liczby cykli N.

Wyniki badań i ich analiza

Badania statyczne wykazały, że wyżarzanie normalizujące obniża własności mechaniczne materiałów platerowanych. Wyniki badań po wykonaniu obróbki cieplnej (OC) przedstawiono w tablicy III.

Szczegółowe porównanie wyników badań ze stopami niklu jako materiałami nakładanymi opisano w pracy [7]. Statyczne badania plateru z materiałem nakładanym SAF2507 po obróbce cieplnej okazały się niemożliwe, ponieważ obróbka cieplna spowodowała drastyczne zmiany własności materiału, który pękał jak szkło. Wyniki wszystkich badań przed obróbką cieplną w znaczący sposób przekraczają wartości graniczne normy, wg której zakres wytrzymałości na rozciąganie wynosi 485÷620 MPa. Próby rozciągania wykazała, że w przypadku wszystkich platerów obróbka cieplna spowodowała spadek wytrzymałości na rozciąganie, powodując, że wszystkie próby spełniają zakresy norm.

Tablica II. Własności mechaniczne badanych materiałów bez obróbki cieplnej
Table II. Mechanical properties of materials without heat treatment

| Materiał | Własności przy rozciąganiu | | | Wytrzymałość na ścinanie | Próba zginania | Udarność |
|--------------------|----------------------------|-------------|--------------|--------------------------|-------------------|--------------------|
| | R_e , MPa | R_m , MPa | A_{50} , % | R_s , MPa | kąt zginania 180° | Wartość średnia, J |
| P355NH + C-276 | 587 | 649 | 31 | 594 | Bez Wad | 49 |
| P355NH + SAF2507 | 689 | 717 | 25 | 667 | Baz Wad | 67 |
| P355NH + alloy 625 | 608 | 698 | 29 | 611 | Bez Wad | 118 |
| P355NH + 254SMO | 595 | 667 | 29 | 601 | Bez Wad | 52 |
| P355NH + 316L | 509 | 658 | 26 | 602 | Bez Wad | 60 |

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

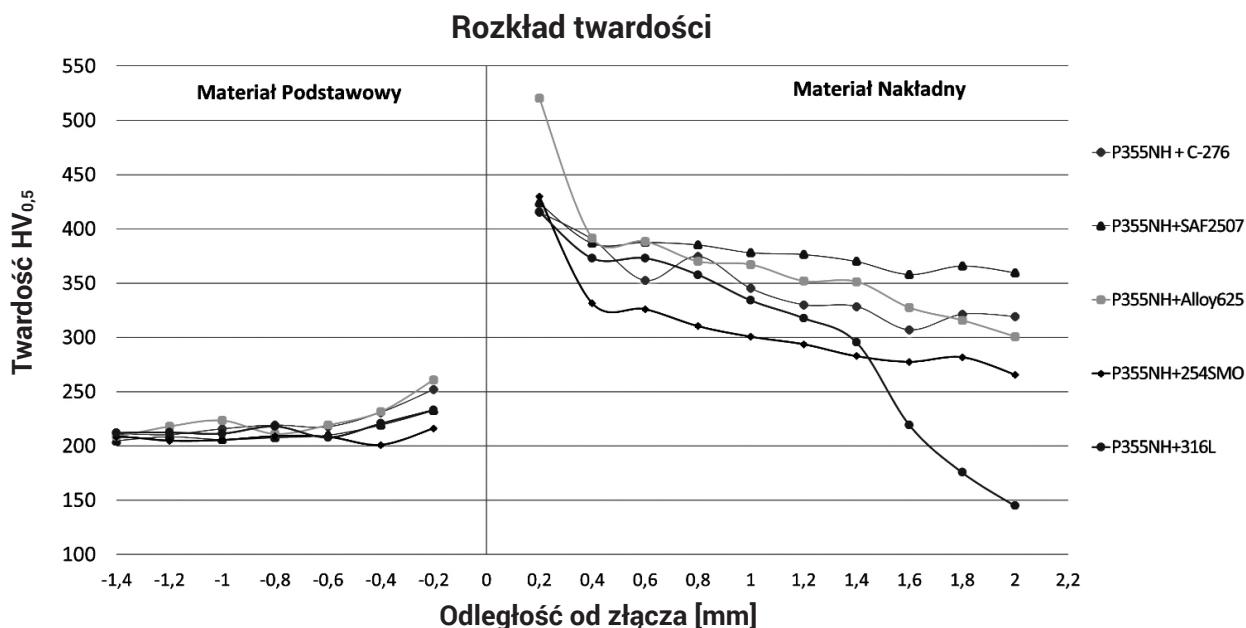
| Materiał | Własności przy rozciąganiu | | | Wytrzymałość na ścinanie | Wytrzymałość na zginanie | Udarność |
|-----------------------|----------------------------|-------------|--------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------|
| | R_e , MPa | R_m , MPa | A_{50} , % | R_s , MPa | kąt zginania 180° | Wartość średnia, J |
| P355NH + C-276 OC | 358 | 583 | 37 | 470 | Bez wad | 102 |
| P355NH + SAF2507 OC | - | | | | Pęknięcie materiału nakładanego | - |
| P355NH + alloy 625 OC | 364 | 600 | 45 | 405 | Bez wad | 30 |
| P355NH + 254SMO OC | 357 | 614 | 33 | 562 | Bez wad | 45 |
| P355NH + 316L OC | 319 | 543 | 41 | 396 | Bez wad | 42 |

Podobnie jak w przypadku rozciągania obróbka cieplna spowodowała spadek wytrzymałości na ścinanie (prawie o 200 MPa w każdym przypadku), co jednak nie wpłynęło na wyniki badań, które spełniały i spełniają wymogi norm wynoszące minimum 140 MPa. Jako kolejna przeprowadzona została próba zginania. W obu przypadkach przed i po obróbce cieplnej próba zginania do 180° nie spowodowała żadnych rozwarstwień z wyjątkiem płyty, gdzie zastosowano materiał nakładany SAF2507 i dotyczyło to badań po obróbce cieplnej. Materiał ten pod wpływem działania siły pękł na całej swojej powierzchni. Jako ostatnie z badań wykonano próbę udarności, w której wymagana minimalna praca wg norm wynosi 27 J. Obróbka cieplna spowodowała spadek pracy łamania jednak przed i po obróbce cieplnej wymagania norm zostały spełnione.

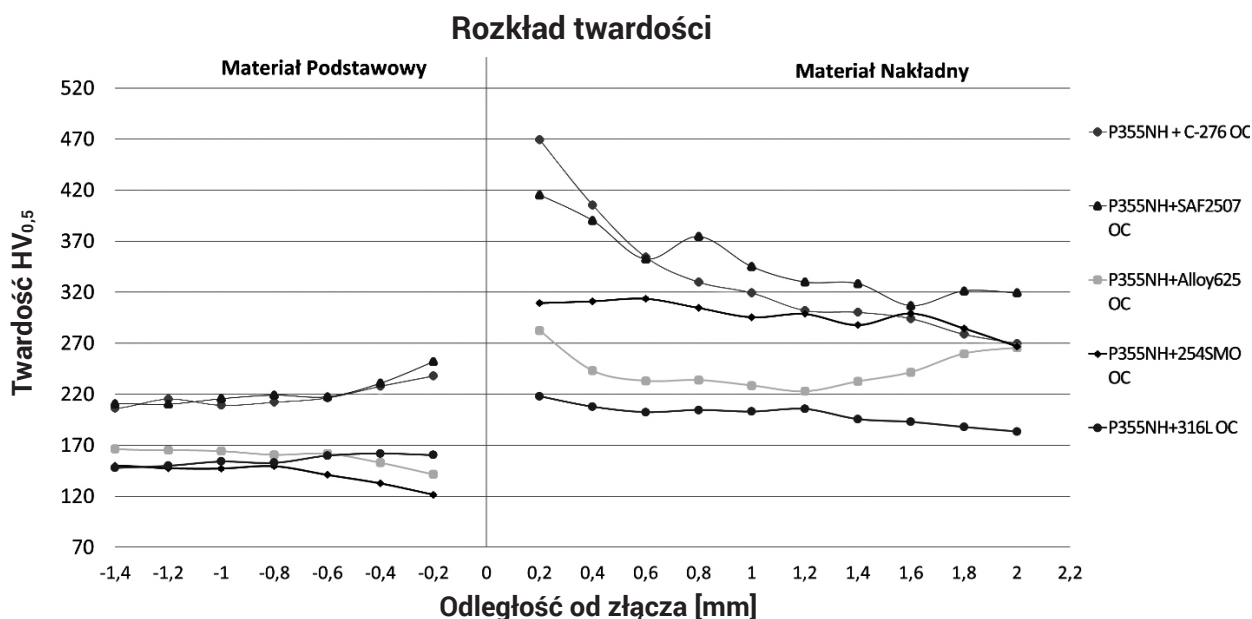
Kolejnym etapem było badanie twardości w przekroju poprzecznym próbki. Wyniki przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 1 i 2. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że w materiale podstawowym,

jak i nakładanym obróbka cieplna spowodowała spadek twardości na całym badanym przekroju. Najwyższe wartości twardości występują w pobliżu linii złącza, co jest spowodowane umocnieniem materiałów, które towarzyszy technologii platerowania wybuchowego. Wraz z oddalaniem się od linii złącza twardość spada. Najwyższą twardość w pobliżu linii złącza wykazuje materiał platerowany stopem niklu alloy 625 przed obróbką cieplną, zaś po obróbce cieplnej plater z materiałem nakładanym C-276.

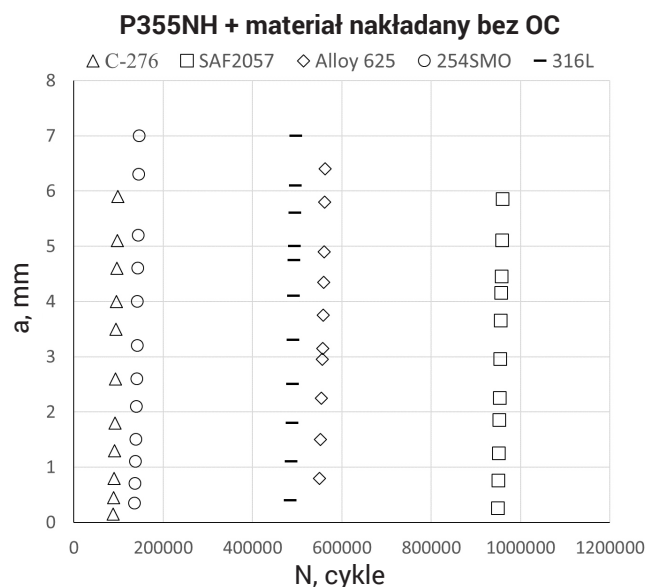
Na podstawie wyników badań zmęczeniowych można stwierdzić, że obróbka cieplna spowodowała spadek trwałości zmęczeniowej badanych materiałów, poza platerem, w którym materiałem nakładanym był 254SMO. Dla tego materiału zaobserwowano wzrost trwałości z 147000 cykli przed OC na 234000 cykli po OC. Najwyższą trwałość zmęczeniową przed OC wykazuje bimetali z materiałem nakładanym SAF2507 zaś po OC z materiałem nakładanym 254SMO. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych platerów bez i po obróbce cieplnej.



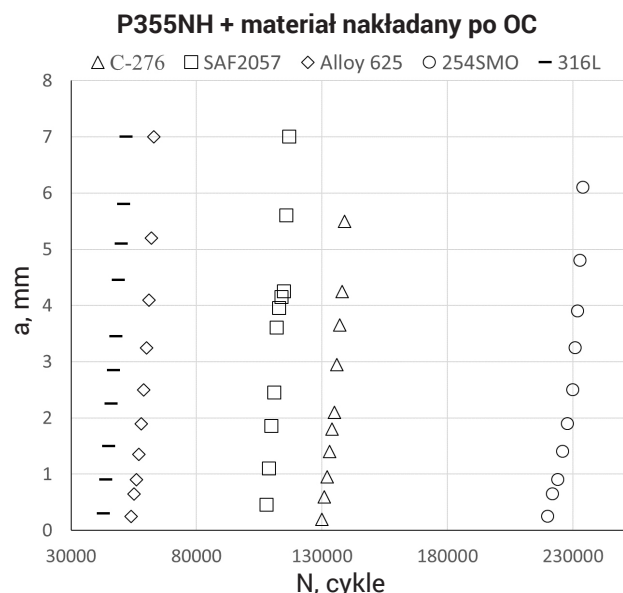
Rys. 1. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym badanych złączy przed obróbką cieplną
Fig. 1. Hardness distribution in cross-section of tested joints before heat treatment



Rys. 2. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym badanych złączy po obróbce cieplnej
Fig. 2. Hardness distribution in cross-section of tested joints after heat treatment



Rys. 3. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli przed obróbką cieplną
Fig. 3. Cracks length vs. number of cycles before heat treatment



Rys. 4. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli po obróbce cieplnej
Fig. 4. Cracks length vs. number of cycles after heat treatment

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Obróbka cieplna powoduje obniżenie własności statycznych materiałów platerowanych.
2. Najwyższe twardości materiałów występują w pobliżu złącza i maleją oddalając się od złącza. Obróbka cieplna spowodowała spadek twardości w każdym badanym materiale.
3. We wszystkich próbkach inicjacja pęknięcia nastąpiła w materiale podstawowym.
4. Badania zmęczeniowe wykazują, że wyżarzanie normalizujące powoduje spadek trwałości zmęczeniowej dla materiałów platerowanych poza platerem z materiałem nakładanym 254SMO.

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 z środków NCBiR decyzją numer DZP/M-ERA.NET-2013/2309/2014.



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] Kwiatkowski G., Rozumek D.: Właściwości mechaniczne wybranych materiałów wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego, Przegląd Mechaniczny, Warszawa, LXXV, 6/2016, s. 23-29.
- [4] ASTM A264-12 Standard specification for stainless chromium-nickel steel-clad plate.
- [5] ASTM A265-12 Standard specification for nickel and nickel-base alloy-clad steel plate.
- [6] Kwiatkowski G., Rozumek D.: The effect of heat treatment parameters on the structure and fatigue cracks growth in steel-titanium bimetal, Inżynieria Materiałowa, Katowice, 2 (210)/2016, pp. 70-75.
- [7] Kwiatkowski G., Rozumek D.: Wpływ wyżarzania normalizującego na rozwój pęknięć zmęczeniowych oraz właściwości materiałów platerowanych stopami niklu, Przegląd Spawalnictwa, Warszawa, Vol. 89, 7/2017, s. 26-30.