

Rozwój pęknięć przy cyklicznym zginaniu w złączu cyrkon-stal powstałych w wyniku zgrzewania wybuchowego

Cracks growth under cyclic bending in zirconium-steel joint made by explosive welding

Streszczenie

W pracy opisano rozwój pęknięć zmęczeniowych w próbkach cyrkon-stal wykonanych metodą zgrzewania wybuchowego. Badano próbki bez warstwy przetopionej A1 i z warstwą przetopioną A2. Badane próbki o przekroju poprzecznym prostokątnym poddano zginaniu przy wartości średniej naprężenia równej zero. Wykonano pomiary twardości (w skali mikro) w obszarze złącza. Wzrost pęknięć zmęczeniowych był cyklicznie mierzony przy użyciu mikroskopu optycznego. W próbkach obserwowano wzrost pęknięć zmęczeniowych równoległe do przyłożonego obciążenia. Rozwój pęknięć następował od strony stali, potem występował w cyrkonie. Dominowały pęknięcia transkryystaliczne zarówno w cyrkonie, jak i w stali.

Słowa kluczowe: złącza różnorodne, zgrzewanie wybuchowe

Abstract

The paper presents fatigue crack growth in zirconium-steel specimens made by the explosive welding. Specimens without remelted layer A1 and with a remelted layer A2 were tested. The tested specimens of the rectangular cross-section were subjected to bending under the stress mean value equal to zero. The point measurement of hardness was performed in the joint area. The fatigue crack growth was measured in cycles by means of the optical microscope. In the specimens, the fatigue crack growth was observed in parallel to the applied loading. The crack growth started from the side of steel then was initiated in zirconium. At the crack paths in the zirconium and steel, transcrystalline cracks are dominating.

Keywords: dissimilar joints, explosive welding

Wstęp

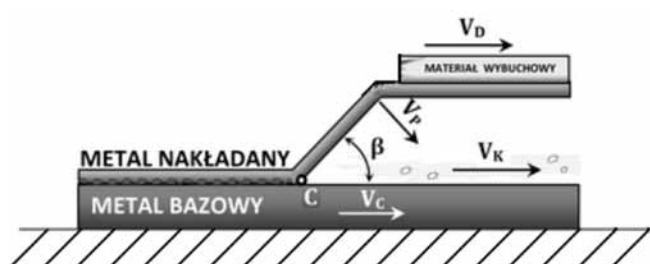
W warunkach eksploatacyjnych elementy konstrukcyjne są narażone na oddziaływanie wielu czynników, takich jak: promieniowanie, wysokie ciśnienie, wibracje, duże gradienty temperatury lub agresywne ośrodki, z którymi mają kontakt, np.: woda, ciekły metal, gaz czy roztopione sole. Niszczenie materiałów pod wpływem tych czynników powoduje skrócenie czasu eksploatacji poszczególnych elementów oraz niesie niebezpieczeństwo awarii. Istotą jest zapewnienie odpowiednich materiałów, a coraz częściej warstwowych kompozycji materiałowych, które dzięki swym specjalnym właści-

wościom sprostają wymaganym oczekiwaniom. Do wytwarzania układów warstwowych w wielu wypadkach stosowana jest technologia zgrzewania wybuchowego [1]. Pozwala ona uzyskiwać trwałe, ciągłe i o bardzo dobrych właściwościach wytrzymałościowych, połączenie dwóch lub kilku materiałów o podobnych, a często nawet bardzo różnych właściwościach mechanicznych. Zwykle są to materiały, których nie można połączyć konwencjonalnymi metodami spajania. Uzyskanie takiego połączenia wymaga szczególnie starannego doboru parametrów procesu zgrzewania wybuchowego, tj. energii wybuchu, prędkości detonacji V_D oraz odległości pomiędzy łączonymi blachami. Parametry te

Dr Mariusz Prażmowski, dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. nzw. PO – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: m.prazmowski@po.opole.pl

wpływają bezpośrednio na prędkość przemieszczania się punktu kolizji V_C i kąt zderzenia β pomiędzy łączonymi blachami, jak również na zjawisko tworzenia się strumienia odwrotnego [2]. Zastosowanie parametrów procesu spajania wybuchowego poniżej wartości granicznych może doprowadzić do powstania nieciągłości lub całkowitego braku połączenia, natomiast przekroczenie wartości krytycznych powoduje nadtapianie powierzchni łączonych blach, czego skutkiem może być tworzenie się niekorzystnych, z punktu widzenia jakości połączenia, obszarów przetopionych o dużej twardości i kruchości [3]. Występowanie tych obszarów ma wpływ na właściwości oraz trwałość eksploatacyjną wytwarzanych układów. Schemat procesu zgrzewania wybuchowego oraz jego parametry przedstawiono na rysunku 1. Płytę nastrzeliwaną, najczęściej z materiału o lepszych właściwościach, umieszczono w pewnej odległości równoległej do płyty bazowej (podstawowej).



Rys. 1. Proces zgrzewania wybuchowego i jego parametry
Fig. 1. Explosive welding process and its parameters

Prędkość detonacji V_D zawiera się w przedziale od 2000 do 3500 m/s i zależy od rodzaju łączonych metali, ich właściwości fizycznych i mechanicznych oraz właściwości zastosowanego materiału wybuchowego. Na przekroju poprzecznym bimetalu wytworzonego technologią zgrzewania wybuchowego można zidentyfikować granicę połączenia o charakterystycznym falistym kształcie oraz sąsiadujący z nią obszar umocnienia, który powstaje w wyniku oddziaływania siły zderzenia łączonych blach.

Celem prezentowanej pracy jest badanie pęknięć zmęczeniowych, które powstały w strefie połączenia przy zginaniu wahadłowym bimetalu cyrkon-stal wytworzonym technologią zgrzewania wybuchowego.

Metodyka badań

Materiałem badanym są dwie bimetale płyty próbne (Zr700/stal P265GH) o wymiarach 500 x 300 mm, wykonane technologią zgrzewania wybuchowego przy różnych parametrach procesu, w układzie równoległym. Prace strzałowe oraz próby technologiczne jakości połączenia wykonane zostały przez ZTW Explomet Sp. j. Uzyskane płyty próbne na całej powierzchni poddano badaniom nieniszczącym metodą ultradźwiękową w celu określenia spójności połączenia oraz ciągłości złącza. Badania wykonano dwuetapowo,

tj. w stanie bezpośrednio po zgrzewaniu oraz po prostowaniu płyt. W obu analizowanych przypadkach zaobserwowano nieznaczne nieciągłości w okolicach miejsca pobudzenia oraz w obszarze założonego marginesu technologicznego (30 mm od krawędzi płyty). Materiałem podstawowym jest blacha ze stali węglowej P265GH, normalizowana, o grubości 20 mm, przeznaczona do pracy w podwyższonych temperaturach. Materiałem nakładanym jest blacha cyrkonowa Zr 700 o grubości 3,175 mm. Skład chemiczny materiałów występujących w złączu podano w tabelach I i II.

Tablica I. Skład chemiczny cyrkonu Zr700 % wag.

Table I. Chemical composition of the zirconium Zr700 in wt.%

C	Fe	Cr	H	O	N
< 0,002	0,05	0,05	< 0,0003	0,05	< 0,002

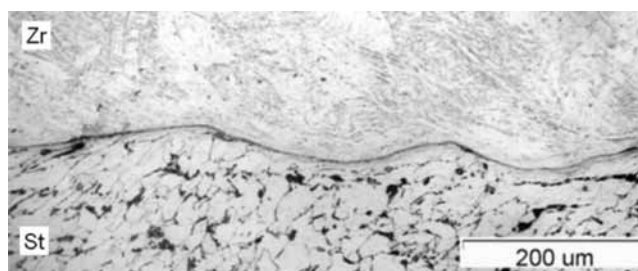
Tablica II. Skład chemiczny stali P265GH % wag.

Table II. Chemical composition of the P265GH steel in % wt

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	V
0,147	0,959	0,26	0,011	0,006	0,03	0,022	0,06
N	Al	Mo	Ti	Nb	Fe		
0,004	0,051	0,005	0,004	0,008	reszta		

Do badań metalograficznych pobrano próbki z blach wyjściowych (przed aktem strzałowym) oraz z bimetali po spojeniu. Próbki bimetale w zależności od zastosowanych parametrów procesu, a tym samym uzyskanego charakteru połączenia, oznaczono odpowiednio A1 (bez przetopienia) i A2 (z przetopieniem). W przypadku platerów zgłady metalograficzne wykonano na przekroju prostym do powierzchni płyty, jednocześnie równoległe do kierunku przemieszczania się fali wybuchu. Zgłady wstępnie szlifowano i polerowano mechanicznie (papierami ściernymi oraz pastami diamentowymi o zmniejszającej się gradacji), a ostatecznie polerowano i trawiono elektrolitycznie na polerce LectroPol 5 z zastosowaniem elektrolitu Struers™. Badania metalograficzne prowadzono na mikroskopie optycznym Olympus IX 70 współpracującym z komputerowym analizatorem obrazu Leco IA 32.

Na rysunku 2 przedstawiono przekrój poprzeczny połączenia bimetaleowego Zr/stal, przy powiększeniu 50x (od góry struktura cyrkonu, a od dołu struktura stali).

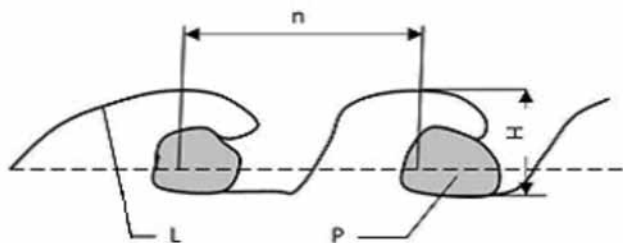


Rys. 2. Strefa złącza plateru cyrkon-stal
Fig. 2. The zone of zirconium-steel clad joint

Złącze charakteryzuje się falistą granicą połączenia o małej amplitudzie z typową dla połączeń zgrzewanych wybuchowo strefą odkształconych ziaren w bezpośrednim sąsiedztwie granicy połączenia. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczne parametry granicy połączenia po zgrzewaniu wybuchowym.

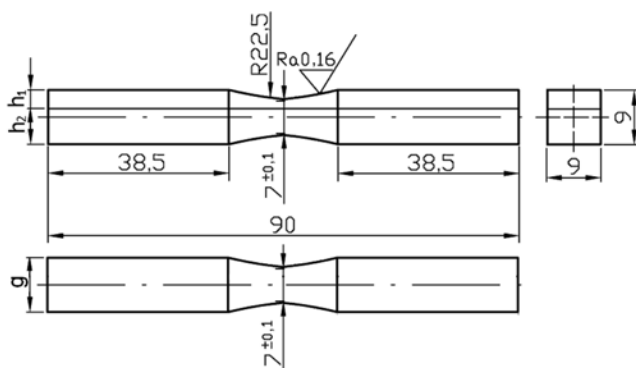
Próbkę do badań zmęczeniowych, o prostokątnym przekroju poprzecznym, pokazano na rysunku 4. Próbki były wycięte z blachy równolegle do kierunku detonacji i przygotowane zgodnie z normą ASTM D 3165-95. Każda próbka ma nacięty zewnętrzny karb o promieniu $R = 22,5$ mm. Powierzchnię próbek poddano frezowaniu i polerowaniu coraz drobniejszym papierem ściernym. Ostateczna średnia chropowatość wynosiła $0,16 \mu\text{m}$. Badano próbki, w których stosunek netto wysokości cyrkonu do stali wynosił $h_1 : h_2 = 1 : 2,5$.

Właściwości statyczne badanych materiałów przed połączeniem przedstawiono w tabelicy III.



Rys. 3. Schemat fali powstałej w wyniku zgrzewania wybuchowego, gdzie: n – długość fali, H – wysokość fali, P – obszary przetopione, L – linia złącza

Fig. 3. Diagram of the wave formed as the result of explosion welding where: n – wave length, H – wave height P – remelted areas, L – interface line



Rys. 4. Kształt i wymiary próbki, w mm

Fig. 4. Shape and dimensions of specimen, in mm

Tabela III. Właściwości mechaniczne badanych materiałów przed połączeniem

Table III. Mechanical properties of materials before cladding

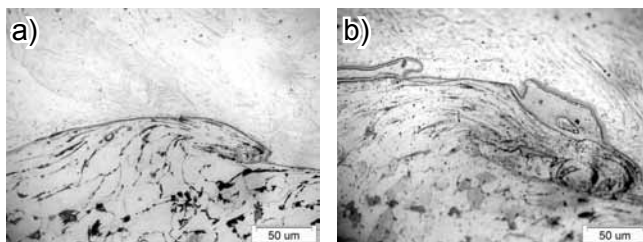
Materiał	R_e , MPa	R_m , MPa	E , GPa	A_5 , %
Zr700	143	300	100	31
P265GH	311	467	210	33

Wyniki rozwoju pęknięć prezentowane w pracy zostały uzyskane na maszynie zmęczeniowej MZGS-100 umożliwiającej realizację przebiegów cyklicznego zginania, skręcania i zginania ze skręcaniem [4]. Badania wykonywano w zakresie niskiej i wysokiej liczby cykli, przy obciążeniu z kontrolowaną siłą (w tym przypadku kontrolowano amplitudę momentu) i częstotliwości obciążenia 28,4 Hz. Badania zmęczeniowe były prowadzone przy współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ i stałej amplitudzie momentu $M_a = 14,2$ Nm, co odpowiadało nominalnej amplitudzie naprężenia normalnego dla przekroju netto $\sigma_a = 248,6$ MPa do inicjacji pęknięcia (naprężenia obliczano dla badanej stali, w której rozwijało się pęknięcie zmęczeniowe). Wykonano również obliczenia położenia osi obojętnej, ponieważ bimetal składa się z dwóch warstw o różnych modułach Younga dla stali i cyrkonu. Z obliczeń wynika, że dla stosunku wysokości warstw w przekroju netto próbki $h_1 : h_2 = 1 : 2,5$ oś ta znajduje się w stali, w odległości 3,08 mm od podstawy. Teoretyczny współczynnik kształtu karbu w próbce wyznaczono zgodnie z równaniem podanym w pracy [5], który przy zginaniu wynosił $\alpha_k = 1,045$. Rozwój pęknięć obserwowano na powierzchniach bocznych próbek za pomocą mikroskopu optycznego bezpośrednio na maszynie zmęczeniowej. Przyrosty pęknięć zmęczeniowych mierzono za pomocą mikrometru umieszczonego w mikroskopie przenośnym o powiększeniu 25x z dokładnością 0,01 mm, notując jednocześnie bieżącą liczbę cykli obciążenia N . Pomiar długości pęknięcia „a” do linii złącza mierzono jako przyrost tej długości w poprzek próbki, natomiast na linii złącza również jako przyrost długości pęknięcia, ale wzdłuż próbki.

Wyniki badań i ich analiza

Obserwacje strukturalne

Badania wykazały, że w wyniku zgrzewania wybuchowego z zastosowaniem różnych parametrów procesu uzyskano dwa rodzaje połączeń cyrkon-stal: próbkę A1 charakteryzującą się granicą połączenia bez warstwy przetopionej (rys. 5a) oraz próbkę A2 z wyraźną warstwą przetopioną (rys. 5b). Proces prowadzono przy jednakowej odległości pomiędzy łączonymi blachami, wynoszącej 4,5 mm oraz dla różnych



Rys. 5. Mikrostruktura złącza cyrkon-stal: a) bez warstwy przetopionej, b) z warstwą przetopioną

Fig. 5. Joint microstructure of zirconium-steel: a) without remelted layer, b) with remelted layer

prędkości detonacji V_D , które wynosiły odpowiednio 2000 m/s (próbka A2) i 2200 m/s (próbka A1).

W tabelicy IV podano zmierzone wartości średnie parametrów złącza, tj. wysokość i długość fali dla badanych bimetałów. Ze względu na występowanie obszarów przetopionych określono *współczynnik równoważnej grubości przetopień (RGP)*, wyrażany jako stosunek sumy powierzchni obszarów przetopionych P (w μm^2) do pomiarowej długości linii złącza L (w μm).

$$RGP = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{L} \mu\text{m}$$

Przy większej prędkości detonacji (próbka A1) uzyskano średnią wysokość fali $H = 53 \mu\text{m}$ oraz długość $n = 409 \mu\text{m}$. Spadek prędkości detonacji o 10% (próbka A2) spowodował wzrost parametrów fali o blisko 100%; wynosiły one odpowiednio: $H = 116 \mu\text{m}$ oraz $n = 725 \mu\text{m}$. Zaobserwowano również wzrost udziału warstwy przetopionej (współczynnik RGP) z poziomu 0,02 μm dla próbki A1 do wartości 10,98 μm dla próbki A2 (tabl. IV). W przypadku próbki A2 przekroczono wartość graniczną współczynnika RGP przyjętą jako maksymalną dla złącza określanego jako „dobre” (równą 10 μm).

Badania metalograficzne wykazały, że materiał podstawowy (stal P265GH) charakteryzuje się mikrostrukturą ferrytyczno-perlityczną (rys. 2) o równoosiowych ziarnach ferrytu, których średnia wielkość zawiera się w zakresie od 10 do 20 μm oraz ziarnami perlitu o średnicy od 4 do 11 μm . Pasmowy układ ziaren perlitu, obserwowany w stanie wyjściowym, uległ częściowemu zanikowi w wyniku odkształcenia plastycznego i wpływu temperatury w strefie połączenia. Mikrostruktura cyrkonu Zr 700 przed zgrzewaniem wybuchowym charakteryzowała się równoosiowymi ziarnami, zbudowanymi z ukierunkowanych pakietów fazy α o średnicy ziarna od 70 do 170 μm . Przedstawiona na rysunku 2 mikrostruktura cyrkonu w strefie połączenia charakteryzuje się wydłużonymi ziarnami odkształconymi w kierunku przemieszczania się fali detonacyjnej.

Tabela IV. Charakterystyczne parametry złącza
Table IV. Characteristic parameters of the joint

Długość linii złącza L , μm (próbka)	Średnia wysokość fali H , μm	Średnia długość fali n , μm	Suma powierzchni przetopień P , μm^2	Wartość współ. RGP, μm
15 623 (A1)	53	409	375	0,02
13 318 (A2)	116	725	146 287	10,98

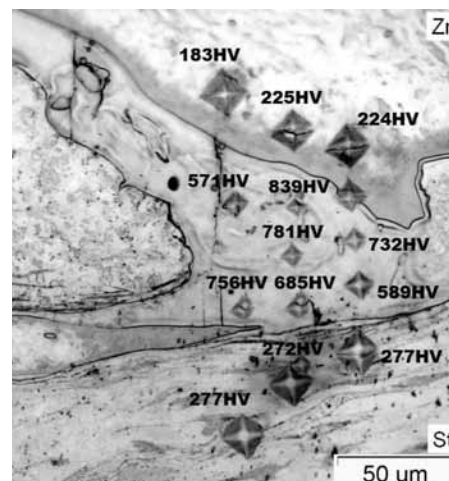
Pomiary twardości

Pomiary twardości wykonano wzdłuż 3 linii pomiarowych prostopadłych do granicy złącza, na całym przekroju bimetału cyrkon-stal, a ich wyniki zamieszczono w pracy [6]. Pomiary wykonano twardościomie-

rzem Leco MHT 200, metodą Vickersa przy obciążeniu 50 G. W obydwu przypadkach (próbka A1 i A2) zaobserwowano wzrost twardości w kierunku granicy połączenia, przy czym maksymalne wartości twardości zanotowano w odległości 0,02 mm od linii złącza, zarówno w materiale bazowym (stal), jak i nakładanym (cyrkon). W realizowanej pracy analizowano rozkład twardości w strefie połączenia ze szczególnym uwzględnieniem obszarów przetopionych (próbka A2). Wyniki pomiarów twardości przedstawiono na rysunku 6. Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że twardość materiału nakładanego w pobliżu granicy cyrkon-warstwy przetopionej wynosi 183÷225 HV_{0,05}, natomiast dla materiału podstawowego w pobliżu granicy przetopienie-stal uzyskano wartości 272÷277 HV_{0,05}. W obydwu analizowanych materiałach zaobserwowano wzrost twardości w stosunku do twardości materiałów przed zgrzewaniem o 20% dla cyrkonu i 30% dla stali. Największą twardość uzyskano w warstwie przetopionej – 571÷839 HV_{0,05}. Twardość w obszarach przetopionych jest około trzykrotnie większa w stosunku do średniej twardości cyrkonu i stali w strefie połączenia. Analiza składu chemicznego strefy przetopionej [7] wykazała występowanie w niej faz typu Fe_xZr_y o zmiennej koncentracji poszczególnych pierwiastków w różnych jej obszarach. Warunki, w których tworzą się obszary przetopione, tj. bardzo wysokie ciśnienie oraz bardzo krótki czas krzepnięcia, mają istotny wpływ na ich znacznie większą twardość. Tak duża twardość powoduje wzrost kruchości tych obszarów, co sprzyja powstawaniu mikropęknięć wewnątrz obszarów przetopionych (rys. 6). Zjawisko to potwierdza możliwość występowania naprężeń wewnętrznych powstałych w czasie zgrzewania.

Badanie właściwości statycznych

W celu oceny zgodności bimetału z wymogami norm obowiązujących dla materiałów platerowanych wybuchowo przeprowadzono, zgodnie z normą EN13445-2, badania właściwości mechanicznych, tj. próbę ścinania, zginania bocznego oraz próbę odrywania.



Rys. 6. Mikrostruktura złącza bimetału cyrkon (Zr) - stal (St) wraz z wynikami pomiaru mikrotwardości
Fig. 6. Joint microstructure of the zirconium-steel bimetal together with results of microhardness

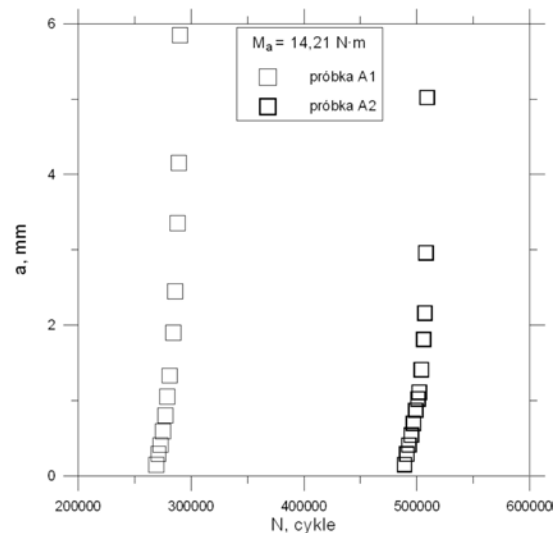
Wytrzymałość bimetalu na ścinanie wynosiła $R_S = 365$ MPa i ponad dwukrotnie przekraczała wymaganą przez normę ASTM B898 wartość 140 MPa. Również przy badaniach wytrzymałości na odrywanie zanotowano zbliżone wartości, które wynosiły odpowiednio dla próbki A1 $R_o = 525$ MPa oraz dla próbki A2 $R_o = 518$ MPa. Próbka A2 wykazywała również mniejszą wytrzymałość na rozciąganie, która wynosiła $R_m = 481$ MPa, natomiast dla próbki A1 była równa $R_m = 496$ MPa. Nieznaczny spadek właściwości wytrzymałościowych w przypadku próbki A2 można tłumaczyć występowaniem kruchej i twardej (co potwierdzono w badaniach mikrotwardości) warstwy przetopionej. Na podstawie próby statycznego rozciągania można zauważyć, że wytrzymałość złącza cyrkon-stal jest o ok. 6% wyższa od materiału podstawowego (co potwierdzono na kilku próbkach). Dla bimetalu norma ASTM A 263-94 przewiduje, że wytrzymałość na rozciąganie powinna zawierać się w zakresie pomiędzy minimalną wartością R_m materiału podstawowego a maksymalną wartością bimetalu i nie może przekroczyć maksymalnej wartości materiału podstawowego o 35 MPa. Powyższa wartość R_m dla bimetalu spełnia zalecenia normy.

Badanie rozwoju pęknięć zmęczeniowych

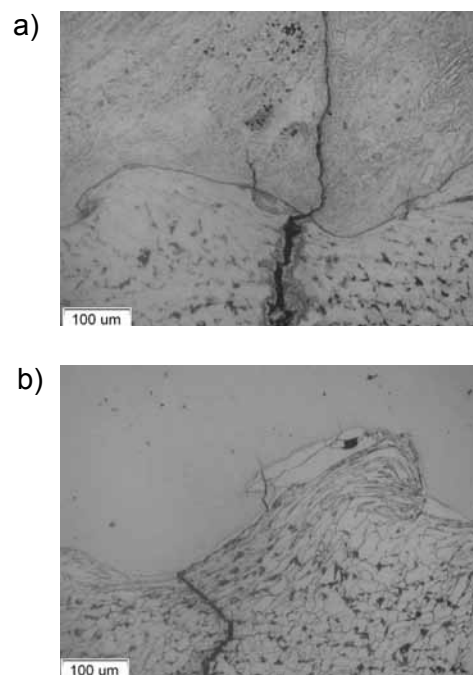
Podczas prowadzenia badań zmęczeniowych przy zginaniu obserwowano rozwój pęknięć w bimetalu cyrkon-stal dla próbek A1 i A2. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy rozwój pęknięć zmęczeniowych próbek w funkcji liczby cykli. Próbki badano przy amplitudzie obciążenia $M_a = 14,2$ Nm, a zniszczenie nastąpiło w próbce A1 po $N_f = 290$ 000 cykli, natomiast w próbce A2 po $N_f = 509$ 000 cykli. Inicjację pęknięcia zmęczeniowego obserwowano w próbce A1 po 269 000 cykli, a próbce A2 po 489 000 cykli, natomiast wzrost pęknięcia mierzono od długości 0,17 mm (A1) i 0,15 mm (A2). Próbki charakteryzowały się równomiernym wzrostem pęknięć zmęczeniowych po obu stronach powierzchni bocznych. Podczas badań obserwowano rozwój pęknięć zmęczeniowych od strony stali. W trakcie wzrostu pęknięcia w stali następował również rozwój pęknięcia w cyrkonie, ale dominujące pęknięcia rozwijały się w stali.

Pęknięcia pokazane na rysunku 8 rozwijały się w płaszczyznach największych naprężeń normalnych w stali i po dojściu do złącza przecinały je (próbka A1), przechodząc do cyrkonu, w którym rozwijały się podobnie jak w stali. W próbce A2 rozwijające się pęknięcie po dojściu do linii złącza przebiegało wzdłuż tej linii, a następnie w warstwie przetopionej pod różnymi kierunkami, przechodząc do cyrkonu w postaci kilku pęknięć w różnych miejscach. Po przejściu pęknięcia przez linię złącza (warstwę przetopioną) wzrastało ono podobnie jak w próbce A1 (rys. 8b). Przyczynę takiego zachowania się pęknięć (próbka A1) można tłuma-

czyć różnym stopniem lokalnego zdefektowania sieci krystalograficznych obu materiałów na granicy złącza, w wyniku zderzenia łączonych materiałów. Natomiast rozwój pęknięć następuje w miejscach, gdzie wskutek zdefektowania sieci krystalograficznej wiązania międzyatomowe są najsłabsze. W przypadku próbki A2 podczas jej badań rozwijały się mikropęknięcia w warstwie przetopionej (kruchej), które powodowały relaksację naprężeń w bimetalu i tym samym wpływały na wzrost trwałości zmęczeniowej. Taki sam proces (wzrost trwałości) obserwowano również przy innych obciążeniach dla próbek A2.



Rys. 7. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli
Fig. 7. Cracks length vs. number of cycles



Rys. 8. Mikrostruktura i ścieżka pęknięcia w złączu cyrkon-stal
Fig. 8. Microstructure and crack path in zirconium-steel joint

Wnioski

Na podstawie badań próbek bimetalu sformułowano następujące wnioski:

1. Twardość stali bezpośrednio przy granicy metal-warstwa przetopiona jest wyższa od twardości cyrkonu. Występująca w próbce A2 warstwa przetopiona charakteryzuje się 2÷3 krotnym wzrostem twardości w stosunku do najwyższych twardości materiałów łączonych.
2. Nieznacznie wyższe wytrzymałości statyczne wykazuje próbka A1 w stosunku do próbki A2, natomiast wytrzymałość zmęczeniowa dla próbek A2 jest ok. 1,5 raza wyższa niż dla próbek A1.
3. Zarówno w stali, jak i cyrkonie przeważają pęknięcia transkrystaliczne, ale obserwowano również pęknięcia po granicach ziaren.
4. Inicjacja i rozwój pęknięć zmęczeniowych przebiegały głównie w stali. Natomiast zaobserwowano rozwój pęknięć zarówno na wskroś przekroju poprzecznego próbki, jak i po linii złącza w próbkach A2.

Literatura

- [1] Crossland B., Explosive welding of metals and its application, Claredon Press, Oxford, 1982.
- [2] Banker J., Advances in Explosion Welding, The Handbook of Advanced Welding, Woodhead Publishing Ltd, London, 2004.
- [3] Prazmowski M., Paul H., Rozumek D., Marcisz E., Influence of the microstructure near the interface of the fatigue life of explosively welded (carbon steel)/Zr clads, Key Engineering Materials, Vols. 592-593, 2014, pp. 704-707.
- [4] Rozumek D., Mieszane sposoby pęknięcia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych, Studia i Monografie, z. 241, Politechnika Opolska, Opole, 2009, s. 152.
- [5] Thum A., Petersen C., Swenson O., Verformung, Spannung und Kerbwirkung. VDI, Duesseldorf, 1960.
- [6] Prazmowski M., Paul H., Charakterystyka bimetalu cyrkonu zgrzewanych wybuchowo przy różnych parametrach procesu, Przegląd Spawalnictwa, Warszawa, 4/2012, s. 15-21.
- [7] Prazmowski M., Paul H.: The effect of stand-off distance on the structure and properties of zirconium – carbon steel bimetal produced by explosion welding, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 57, No. 4, pp. 1201-1210.

Praca częściowo finansowana ze środków budżetowych na naukę jako projekt badawczy nr: NN507 457839.

PLANY SPAWANIA - TEORIA I PRAKTYKA - JACEK SŁANIA

Cena

Cena 1 egzemplarza książki Jacka Słania:
Plany spawania – teoria i praktyka wynosi:
80 zł (w tym 5% VAT)

**W celu zamówienia książki
w Redakcji należy wypełnić formularz
zamieszczony obok i przesłać go
w formie faksu, skanu lub listu na adres:**

REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79
e-mail: pspaw@ps.pl

Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie
45 1060 0076 0000 3200 0043 1836

Zamawiam książkę *Plany spawania – teoria i praktyka*
w Redakcji Przegląd Spawalnictwa w liczbie egz.

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej:

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis