

Wpływ temperatury wygrzewania na trwałość zmęczeniową w bimetalach stal-tytan otrzymanych metodą zgrzewania wybuchowego

The effect of annealing temperature on the fatigue life in bimetal steel-titanium made by explosive welding

Streszczenie

W pracy opisano wpływ obróbki cieplnej na rozwój pęknięć zmęczeniowych w próbkach stal-tytan wykonanych metodą zgrzewania wybuchowego. Badane próbki o przekroju poprzecznym prostokątnym poddano zginaniu przy wartości średniej naprężenia równej zero. Dokonano pomiaru twardości w obszarze złącza. Wzrost pęknięć zmęczeniowych był cyklicznie mierzony przy użyciu mikroskopu optycznego. W próbkach obserwowano wzrost pęknięć zmęczeniowych równoległe do przyłożonego obciążenia, którego kierunek zmieniał się na linii złącza bimetalu. Następnie obserwowano rozwój pęknięcia wzdłuż linii złącza powodując rozwarstwienie bimetalu. Rozwój pęknięć następował od strony stali lub tytanu w zależności od zastosowanej obróbki cieplnej (wielkość ziarna). Na przelomach bimetalu występują zarówno pęknięcia przebiegające transkrystaliczne jak i po granicy ziaren.

Słowa kluczowe: zgrzewanie wybuchowe, bimetale, stal, tytan, mikrostruktura, pęknięcia

Abstract

The paper presents influence of heat treatment on the fatigue crack growth in steel-titanium specimens made by the explosive welding. The tested specimens of the rectangular cross-section were subjected to bending under the stress mean value equal to zero. The 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 direction of which varied along the interface line. Next, the crack growth was observed along the interface line when the bimetal was stratified. The crack growth started from the side of steel or titanium depending on the heat treatment (grain size). At the bimetal fractures there were both the cracks running transcrystalline and along the grain boundary ones as well.

Keywords: explosive welding, bimetal, steel, titanium, microstructure, cracks

Wstęp

Odporność korozyjna tytanu jest znana i dlatego jest on chętnie stosowany do budowy aparatury procesowej, głównie w przemyśle chemicznym, energetycznym, farmaceutycznym, petrochemicznym, itp. Wysoka cena tytanu skłania do stosowania materiałów platerowanych, gdzie tytan stanowi jedynie warstwę

o niewielkiej grubości (zwykle 3-6 mm) nałożoną na materiał podstawowy. Podczas platerowania metodą wybuchową, zgrzewane blachy zostają rozpędzone do bardzo dużych prędkości [1]. W wyniku ich wzajemnego zderzenia dochodzi do umocnienia obu blach, w największym stopniu w strefie złącza. Zjawiska te, jak i sam proces, opisano szerzej w publikacjach [2, 3]. Proces ten prowadzi do powstania silnych

Dr Robert Bański, dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. PO – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: r.banski@po.opole.pl

naprężeń w łączonych materiałach, wzrostu ich gęstości dyslokacji i ich twardości oraz zmniejszenia ciągliwości. W celu usunięcia powstałych zmian, plater po zgrzewaniu poddaje się wyżarzaniu, głównie odprężającemu. Problemem jest natomiast ustalenie temperatury obróbki cieplnej, albowiem oba łączone materiały mają odmienne właściwości i wymagają różnych temperatur obróbki cieplnej. W przedstawionym artykule omówiono plater składający się ze stali S355J2+N jako materiału podstawowego i tytanu Grade1 jako warstwy wierzchniej (nastrzelowanej). Do badań wytypowano plater, w którym w strefie złącza występuje niewielka ilość fazy przetopionej.

Celem pracy jest badanie trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem rozwoju pęknięć przy zginaniu wahadłowym w bimetalach stal-tytan poddanych wpływom różnej temperatury wygrzewania.

Metodyka badań

Badaniom poddano próbki pobrane z blach o wymiarach 3650 mm x 1900 mm wykonane metodą platerowania wybuchowego przez Z.T.W. EXPLOMET. Materiałem bazowym była blacha stalowa S355J2+N o grubości 40 mm, natomiast materiałem nakładanym tytan Gr.1 (SB265Gr.1) o grubości 6 mm. Skład chemiczny obu materiałów podano w tablicy I i II. Stal S355J2+N (wg PN-EN 10025) to stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości, używana do budowy konstrukcji narażonych na działanie warunków atmosferycznych. Charakteryzuje się ona dużą wytrzymałością oraz odpornością na korozję i jest dobrze spawalna, ma strukturę ferrytyczno-perlityczną [4]. Tytan Grade 1 to czysty technicznie materiał o jednofazowej strukturze α .

Tablica I. Skład chemiczny tytanu Gr.1, %wag.

Table I. Chemical composition of the titanium Gr.1 in %wt.

C	Ti	N	H	Fe	O
0,004	Reszta	0,006	0,003	0,025	0,053

Tablica II. Skład chemiczny stali S355J2+N, %wag.

Table II. Chemical composition of the S355J2+N steel,

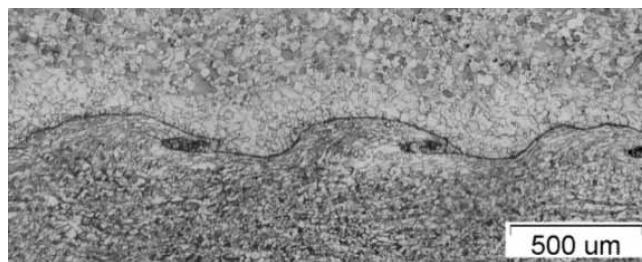
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
0.189	1.41	0.30	0.01	0.004	0.23	0.03	0.05
Mo	V	Ti	Al	N	Nb	Fe	
0.004	0.003	0.002	0.031	0.005	0.003	Reszta	

W celu usunięcia naprężeń jakie powstały w trakcie platerowania, bimetale poddano obróbce cieplnej polegającej na podgrzaniu do temperatury: 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, oraz 900°C z prędkością 90°C/h i wygrzaniu przez 24 h. Następnie chłodzono bimetale z piecem z prędkością 100°C/h. Zastosowano taki zakres

temperatury w celu wyznaczenia temperatury występowania zjawisk dyfuzyjnych na granicy złącza bimetalu. Dobry zakres temperatury w przypadku tytanu odpowiada wyżarzaniu odprężającemu, rekrystalizującemu oraz przemianom alotropowym Ti_{α} w Ti_{β} .

Próbki do badań metalograficznych wycinano z plateru i analizowano na przekroju równoległym do kierunku przemieszczania się fali wybuchu. Próbki pobrano z miejsc najbardziej oddalonych od punktu pobudzenia wybuchu, które to miejsca mają teoretycznie najgorsze właściwości wytrzymałościowe po złączeniu materiałów. Zgłady metalograficzne wykonano przez szlifowanie na papierach ściernych, polerowanie z użyciem past diamentowych, a następnie trawiono: tytan – roztworem kwasu fluorowodorowego, natomiast stal – nitaliem. Tak przygotowany materiał badano z wykorzystaniem mikroskopii optycznej (mikroskop OLYMPUS IX70) z zastosowaniem światła spolaryzowanego, kontrastu fazowego oraz z wykorzystaniem komputerowego analizatora obrazu (LECO IA 32) dla określenia morfologicznych parametrów opisujących strefę połączenia.

Na rysunku 1 pokazano przekrój poprzeczny połączenia dwóch blach, przy powiększeniu 50x, na którym widać na górze strukturę tytanu, a na dole strukturę stali.



Rys. 1. Strefa złącza plateru stal-tytan

Fig. 1. The zone of steel-titanium clad joint

Złącze to ma charakterystyczną budowę falistą z niewielką ilością obszarów przetopionych oraz mikropęknięć i mikropustek w zawinięciu fal. W tablicy III podano zmierzone wartości średnie parametrów złącza występujące w badanym platerze w zależności od zastosowanej temperatury obróbki cieplnej.

Tablica III. Charakterystyczne parametry złącza

Table III. Characteristic parameters of the joint

Temp. wygrz. °C	Średnia długość fali λ , μm	Średnia wysokość fali h , μm	Pomiarywa długość linii złącza L , μm	Suma powierzchni przetopień S , μm^2	Wartość wsp. RGP, μm
500	843	99	23784	71325	3,0
600	781	79	22215	67834	3,1
700	823	87	23276	56390	2,4
800	715	99	23874	90295	3,8
900	822	92	23716	72346	3,1

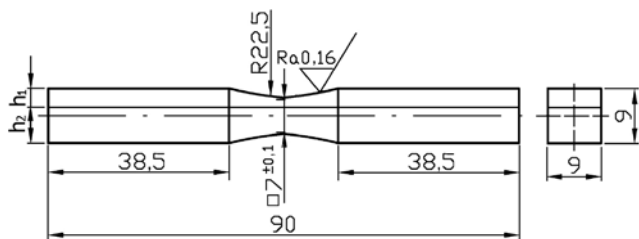
Właściwości statyczne badanych materiałów przed połączeniem są zawarte w tabelicy IV. Wytrzymałość plateru na ścinanie powinna wynosić min 140 MPa zgodnie z ASTM B898, a w otrzymanych platerach stal-tytan wynosiła 343 MPa.

Tablica IV. Właściwości mechaniczne badanych materiałów przed połączeniem

Table IV. Mechanical properties of materials before cladding

Materiał	R _e , MPa	R _m , MPa	E, GPa	A ₅ , %
Ti Gr.1	193	308	104	46
S355J2+N	368	578	210	30

Próbki do badań zmęczeniowych, o prostokątnym przekroju poprzecznym, pokazano na rysunku 2. Były one wycięte z blachy równolegle do kierunku detonacji i przygotowane zgodnie z ASTM D 3165-95. Każda próbka ma nacięty zewnętrzny karb o promieniu R = 22,5 mm. Powierzchnia próbki została uzyskana poprzez frezowanie i polerowanie z zastosowaniem coraz drobniejszego papieru ściernego. Ostateczna średnia chropowatość wynosiła 0,16 μm. Badano próbki, w których stosunek netto wysokości tytanu do stali wynosił h₁ : h₂ = 1 : 2,5.



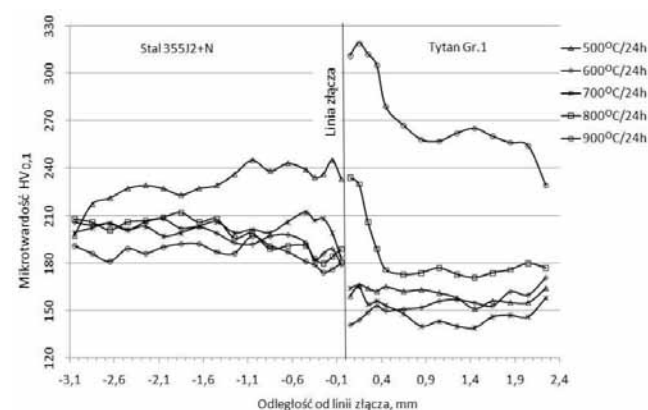
Rys. 2. Kształt i rozmiary próbki do badań, wymiary w mm
Fig. 2. Specimen for tests of fatigue crack extension, dimensions in mm

Badania prezentowane w pracy zostały uzyskane na Politechnice Opolskiej w Opolu i wykonano je na maszynie zmęczeniowej MZGS-100 umożliwiającej realizację przebiegów cyklicznego zginania, skręcania i zginania ze skręcaniem [5]. 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 σ_a = 248,6 MPa do inicjacji pęknięcia (naprężenia obliczono dla badanej stali, w której rozwijało się pęknięcie zmęczeniowe). Różna sztywność materiałów powoduje, że oś obojętna nie występuje w miejscu linii złącza tylko jest przesunięta. Po obliczeniu położenia osi obojętnej można stwierdzić, że dla stosunku wysokości próbki h₁ : h₂ = 1 : 2,5 oś ta znajduje się w stali w odległości 3,08 mm od podstawy. Teoretyczny współczynnik kształtu karbu w próbce, który przy zginaniu wynosił α_k = 1,045, wyznaczono zgodnie z równaniem

podanym w pracy [6]. 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

Pomiary twardości prowadzono wzdłuż linii prostopadłej do złącza i stwierdzono, że twardość wzrasta w stronę linii złącza i maksimum osiąga w jej okolicy (rys. 3). Pomiary twardości wykonano, na twardościomierzu LECO AMH 2000, metodą Vickersa przy obciążeniu 100 g. Uśrednione wyniki pomiarów twardości przedstawiono na rysunku 3. Wynika z nich, że twardość bimetalu nie jest jednorodna i zależy od temperatury wygrzewania. Największe zmiany obserwuje się w tytanie dla temperatury 900°C.



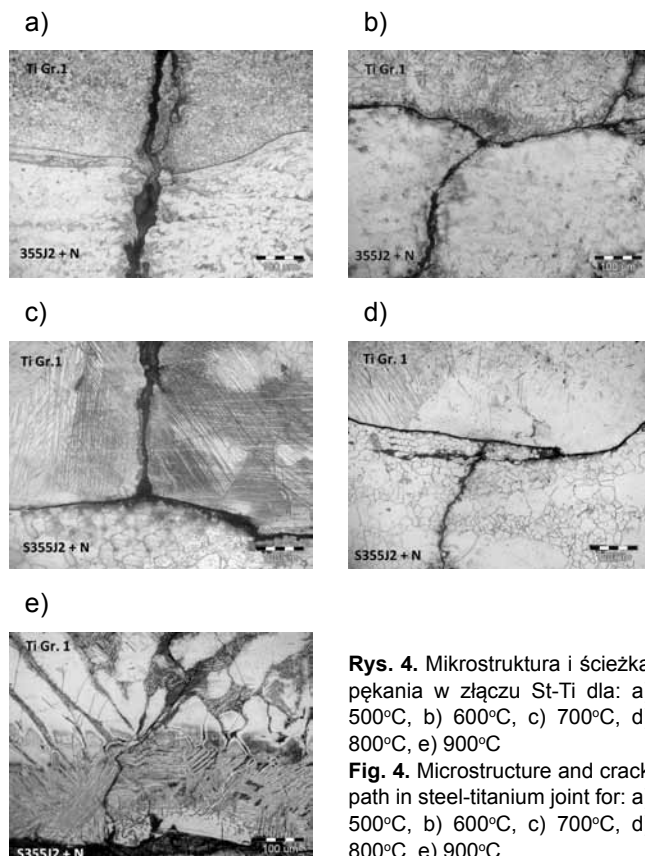
Rys. 3. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym złącza stal-tytan
Fig. 3. Distance from interface vs. hardness variation of steel-titanium joint

Twardość obu połączonych materiałów, w całym ich przekroju, jest wyższa od twardości materiałów przed platerowaniem, wynoszącej odpowiednio dla stali 167 HV_{0,1} i dla tytanu 145 HV_{0,1}. Dla obróbki cieplnej w temperaturze 500°C twardość w pobliżu linii złącza jest wyższa dla stali i wynosi ok. 240 HV_{0,1}, a dla tytanu ok. 165 HV_{0,1}. W przypadku tytanu zastosowanie obróbki cieplnej w zakresie temperatury 500-700°C nie powoduje większych zmian twardości. Dla wyższych temperatur następuje znaczący wzrost twardości, największy obserwuje się w okolicy złącza i wynosi 320 HV_{0,1} dla temperatury 900°C. Natomiast tendencja zmian twardości w stali jest odwrotna niż dla tytanu i dla temperatury 500°C twardość jest największa, natomiast dla temperatury 900°C twardość jest najmniejsza. Przy linii złącza następuje spadek twardości.

W głównej mierze wynika to z tego, że struktura wykazuje w coraz większym stopniu odwęglenie (stopniowe zmniejszanie się ilości perlitu i wzrost ilości ferrytu). W stali zastosowanie obróbki cieplnej powoduje rekrytalizację (w zakresie temperatury 600÷700°C) oraz normalizację (w zakresie temperatury 800÷900°C), która powoduje rozrost ziaren. Podczas rekrytalizacji wtórnej, rozrost ziaren jest uzależniony od stopnia gniotu w odpowiednich obszarach plateru. W tytanie w zakresie temperatury 500÷700°C obserwuje się rekrytalizację i stopniowy rozrost ziaren od 32 µm do 356 µm. Temperatura 800°C i 900°C powoduje dalszy rozrost ziaren tytanu od 490 µm do 935 µm.

Ze wzrostem temperatury w strefie złącza spada twardość stali, a wzrasta tytanu co jest wynikiem dyfuzji węgla ze stali do tytanu. Jest to widoczne w okolicy linii złącza i tu obserwuje się tworzenie twardych i kruchych węglików tytanu. Widoczne jest występowanie czarnych wtrąceń na granicach ziaren w tytanie. Dodatkowo długi czas obróbki cieplnej i mocne zdefektowanie sieci krystalograficznej powstałej podczas zgrzewania wybuchowego ułatwia dyfuzję węgla do tytanu.

Podczas rozwoju pęknięć przy zginaniu w bimetalu stal-tytan poddanym wygrzewaniu w różnej temperaturze zaobserwowano, że próbki charakteryzowały się równomiernym wzrostem pęknięć po obu stronach powierzchni bocznych. Podczas badań doświadczalnych obserwowano rozwój pęknięć zmęczeniowych od strony stali lub tytanu. Pęknięcia pokazane na rysunku 4 rozwijały się przeważnie w płaszczyznach prostopadłych do największych naprężeń normalnych w tytanie



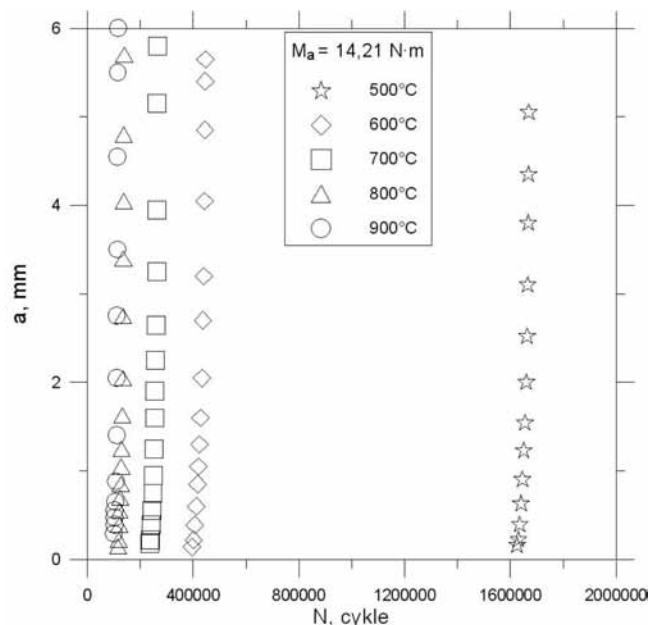
Rys. 4. Mikrostruktura i ścieżka pęknięcia w złączeniu St-Ti dla: a) 500°C, b) 600°C, c) 700°C, d) 800°C, e) 900°C

Fig. 4. Microstructure and crack path in steel-titanium joint for: a) 500°C, b) 600°C, c) 700°C, d) 800°C, e) 900°C

lub stali. Rozwijające się pęknięcie po dojściu do linii złącza przecinało ją i wzrastało podobnie w drugim materiale (rys. 4a) lub przebiegało wzdłuż linii złącza (rys. 4b-4e). Po przejściu pęknięcia przez linię złącza wzrastało ono podobnie, jak przed dojściem do linii złącza z tym, że w drugim materiale plateru. Przyczynę takiego zachowania się pęknięć można tłumaczyć różnym stopniem lokalnego zdefektowania sieci krystalograficznych obu materiałów na granicy złącza, w wyniku zderzenia łączonych materiałów oraz rozrostem ziarna. Natomiast rozwój pęknięć następuje w miejscach, gdzie wskutek zdefektowania sieci krystalograficznej wiązania międzyatomowe są najsłabsze.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe długości pęknięć próbek w funkcji trwałości. Próbki te badano przy obciążeniu $M_a = 14,2 \text{ Nm}$, w którym dla temperatury 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, i 900°C uzyskano trwałości $N_f = 1\,669\,000, 446\,500, 264\,500, 139\,000, 116\,500$ cykli. Inicjację pęknięć zmęczeniowych w próbkach obserwowano po 1 625 000, 395 000, 236 000, 115 500, 102 000 cykli, natomiast wzrost pęknięć mierzono od ich długości ok. 0,14÷0,25 mm.

Inicjacja pęknięć występowała dla próbek wygrzewanych w temperaturze 500°C w tytanie, a dla temperaturze 600°C, 800°C i 900°C w stali, natomiast w temperaturze 700°C obserwowano inicjację zarówno w stali i w tytanie. Wzrost pęknięć zmęczeniowych występował zarówno w stali jak i tytanie, z tym że dominujące pęknięcia rozwijały się w materiałach, w których zostały one wcześniej zainicjowane.



Rys. 5. Długość pęknięcia w funkcji liczby cykli
Fig. 5. Crack length vs. number of cycles

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań próbek bimetalu poddanych obróbce cieplnej, sformułowano następujące wnioski:

1. Zaobserwowano wyraźną zależność pomiędzy temperaturą obróbki cieplnej, a rozwojem pęknięć zmęczeniowych. Im wyższa temperatura wygrzewania tym mniejsza trwałość zmęczeniowa.
2. Temperatura obróbki cieplnej ma wyraźny wpływ na rozkład twardości plateru. Największa twardość występuje w strefie złącza od strony tytanu.
3. Wzrost temperatury zmienia strukturę metalograficzną bimetalu. Ze wzrostem temperatury obróbki cieplnej obserwuje się rekrytalizację oraz rozrost ziaren (głównie w tytanie). Natomiast w stali na granicy złącza występuje odwęglenie.

Literatura

- [1] Crossland B., Explosive welding of metals and its application, Claredonpress, Oxford, 1982.
- [2] Pocica A., Bański R., Szulc Z., Gałka A., Waindok P., Badania bimetalu stal austenityczna – tytan wyżarzane w różnych warunkach. Inżynieria Materiałowa. 5/2008, s. 1-4.
- [3] Bański R., Rozumek D., Rozwój pęknięć zmęczeniowych w bimetalach stal-tytan wykonanych metodą zgrzewania wybuchowego (platerowania). Przegląd Spawalnictwa, Warszawa, 4/2012, s. 9-14.
- [4] Dobrzański L.A., Metalowe materiały inżynierskie. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [5] Rozumek D., Bański R., Crack growth rate under cyclic bending in the explosively welded steel/titanium bimetals. Materials & Design, Vol. 38, No. 6, 2012, pp. 139-146.
- [6] Thum A., Petersen C., Swenson O., Verformung, Spannung und Kerbwirkung. VDI, Duesseldorf, 1960.

Przegląd Spawalnictwa Welding Technology Review Open Access Library

Przegląd Spawalnictwa uruchomił możliwość wolnego dostępu do pełnych treści artykułów w ramach Open Access Library. Artykuły w języku angielskim w formacie PDF zamieszczane są na stronie internetowej redakcji: www.pspaw.ps.pl.

Autorów zainteresowanych publikacją w Open Access Library prosimy o przesyłanie artykułów w języku polskim i angielskim. W miesięczniku nastąpi publikacja w języku polskim, a tekst w języku angielskim zostanie zamieszczony na stronie internetowej.