

Zgrzewanie tarciove ultradroboziarnistej stali 316L

Friction welding of ultrafine grained 316L steel

Streszczenie

W artykule omówiono problematykę zgrzewalności metali o ultradroboziarnistej strukturze. Problem omówiono na przykładzie stali 316L o ultradroboziarnistej strukturze uzyskanej na drodze obróbki plastycznej hydrostatycznego wyciskania.

Złącza uzyskano metodą zgrzewania tarciovego. Parametry zgrzewania dobierano wg kryterium najniższego stopnia rekrytalizacji obszaru złącza. Wykonano badania metalograficzne, scharakteryzowano wybrane obszary złącza zgrzewanego pod względem twardości i zasięgu zmiękczenia materiału. Wykonano próby statycznego rozciągania, porównano wytrzymałość na rozciąganie materiału rodzimego oraz złącza zgrzewanego.

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarciove; zgrzewalność; nanostruktura

Abstract

The article discusses the issues of weldability of metals with UFG (ultrafine grained) metals. The problem was discussed on the example of 316L steel with UFG structure obtained by metal forming method of hydrostatic extrusion.

The joints were obtained by friction welding. Welding parameters were selected according to the criterion of the lowest degree of recrystallization of the joint area. Metallographic examinations were performed, selected areas of the joint welded in terms of hardness and range of softening of the material. Static tensile tests were carried out, the tensile strength of the parent material and the welded joint were compared.

Keywords: friction welding; weldability; UFG metals

Wstęp

Metale ultradroboziarniste UFG (ang. *Ultrafine Grained*) charakteryzują się przede wszystkim średnim wymiarem ziarna $<1 \mu\text{m}$. Nierzadko rozmiary krystalitów mają wartości nanometryczne. Charakterystycznym dla tej grupy materiałów jest również kierunkowość struktury będąca następstwem wytwarzania ich metodami SPD (ang. *Severe Plastic Deformation*), czyli obróbką dużych odkształceń plastycznych [1]. Standardowymi przykładami metod dużego odkształcenia plastycznego są przeciskanie przez kanał kątowy ECAP (ang. *Equal Channel Angular Pressing*) [2] metoda ta jest stosowana najczęściej do uzyskiwania ultradroboziarnistej struktury. Metodą którą wytworzono materiał na eksperyment opisany w niniejszym artykule jest wyciskanie hydrostatyczne HE (ang. *Hydrostatic Extrusion*) [3]. Metale UFG wykazują w stosunku do swych mikrokrystalicznych odpowiedników znaczący wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz wzrost udarności. Efektywne wykorzystanie metali UFG w technice wymaga jednak opracowania skutecznych metod ich spajania. Zastosowanie klasycznych metod spawalniczych bazujących na topieniu brzegów łączonych materiałów nie jest możliwe ze względu na strukturę pierwotną spoiny. Stopienie, a nawet nagrzanie do temperatury rekrytalizacji niszczy specyficzne właściwości metali UFG.

W kontekście silnej skłonności metali UFG do rekrytalizacji, proces spajania wymaga łączenia w stanie stałym w możliwie krótkim czasie. W ramach eksperymentu prowadzono zgrzewanie tarciove prętów ze stali 316L o średnicy 6 mm, których ultradroboziarnista struktura została uzyskana w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN metodą hydrostatycznego wyciskania [4], właściwości materiału zostały szeroko scharakteryzowane w publikacji [5]. W celu zbadania właściwości uzyskanych połączeń próbki poddano badaniom metalograficznym, próbie statycznego rozciągania i pomiarom mikroztwardości. Badania miały na celu analizę wpływu ilości wprowadzonego ciepła na właściwości i mikrostrukturę złącza.

Materiał po procesie wyciskania hydrostatycznego posiada bardzo dużą zmagazynowaną energię wewnętrzną, podwyższoną w wyniku nagromadzenia defektów struktury, na którą ciepło wpływa destrukcyjnie. Ze względu na niestabilną strukturę materiałów ultradroboziarnistych, która łatwo ulega rozrostowi, jako odpowiednią metodę do łączenia tych materiałów, wytypowano zgrzewanie tarciove, ze względu na mechaniczny sposób doprowadzenia precyzyjnie sterowanej ilości ciepła bezpośrednio w miejsce połączenia. Celem pracy było zbadanie wpływu cyklu cieplnego zgrzewania tarciovego na strukturę i wybrane właściwości złączy stali 316L UFG.

Mgr inż. Beata Skowrońska; mgr inż. Piotr Siwek; dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW; dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: b.skowronska@wip.pw.edu.pl

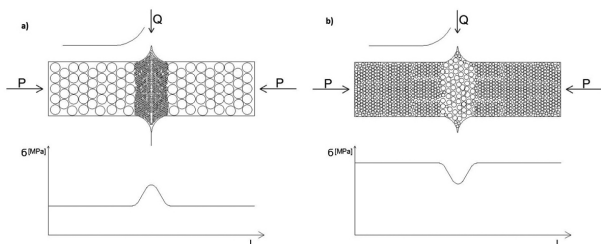
Zastosowana metoda zgrzewania

Zgrzewanie tarcieowe obrotowe to proces, w którym ciepło niezbędne do powstania trwałego połączenia, wydzielane jest w wyniku tarcia w obszarze wzajemnego styku zgrzewanych materiałów, na skutek bezpośredniej zamiany energii mechanicznej na energię cieplną. Istota procesu polega na wytworzeniu złącza poprzez spajanie w stanie stałym. Połączenie uzyskuje się w wyniku odkształcenia plastycznego materiału w obszarze styku łączonych elementów. Energia mechaniczna tarcia powoduje nagrzewanie obszaru styku do stanu silnie uplastycznionego, dodatkowo wywarci siły docisku i zbliżenie czystych metalicznie powierzchni na odległość porównywalną do parametru sieci powoduje powstanie trwałego metalicznego połączenia w stanie stałym [6÷11]. Zgrzeina tworzy się w wyniku aktywowanych cieplnie i mechanicznie dużych naprężeń o wysokim gradientcie, procesów dyfuzji, a także podczas powstawania nowych granic ziaren, rozpuszczania i rozdrabniania tlenków oraz wspólnej krystalizacji metalu w obszarze powierzchni tarcia. Zgrzewanie tarcieowe materiałów o mikrokrystalicznej strukturze prowadzi do wzrostu wytrzymałości materiału w obszarze złącza, jest to spowodowane rozdrobnieniem ziaren w zgrzeinie pod wpływem tarcia w warunkach wysokiego ciśnienia. W przypadku zgrzewania materiałów ultradroboziarnistych powstała zgrzeina jest miejscem o najmniejszej wytrzymałości, jak to schematycznie przedstawiono na rysunku 1. W obszarze wydzielania ciepła, ultradroboziarnista struktura rekrytalizuje, a konsekwencją rekrytalizacji (zmniejszenia udziału objętościowego granic ziaren) jest pogorszenie właściwości mechanicznych.

Zgrzewanie tarcieowe ultradroboziarnistej stali 316L

Zgrzewanie prowadzono na wysokoobrotowej zgrzewarce tarcieowej, charakteryzującej się szerokim zakresem dostępnych parametrów procesu. Prędkość obrotowa głowicy: 6000÷24000 obr/min, siła docisku w fazie tarcia do 20 kN, siła docisku w fazie spęczania do 40 kN, czas tarcia: od 10 ms. Na rysunku 2 przedstawiono sposób zamocowania próbek w maszynie. Jedną z nich umieszczono w obrotowym wrzecionie, oznaczone literą A (rys. 2), natomiast drugą zablokowano w nieruchomym uchwycie –B.

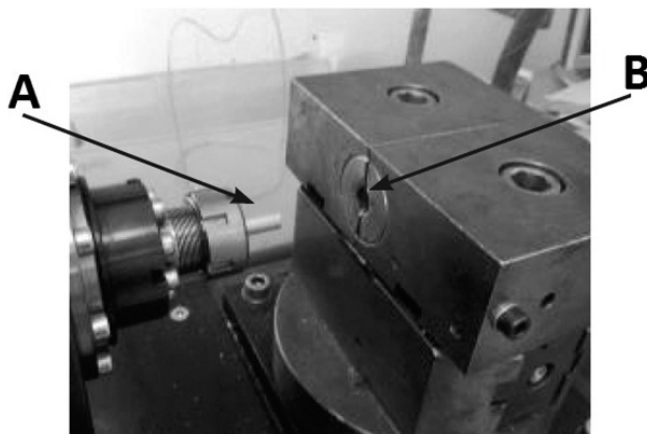
Parametry procesu zgrzewania tarcieowego dobierano według kryterium najwyższej wytrzymałości na rozciąganie złącza zgrzewanego. Nominalnie materiał stali 316L UFG charakteryzuje się właściwościami $R_{p0,2} = 1180$ MPa, $R_m = 1250$ MPa (wartość średnia z czterech pomiarów). Najlepsze uzyskane złącza zgrzewane uzyskały odpowiednio $R_{p0,2} = 780$ MPa, $R_m = 890$ MPa. W tabelicy I przedstawiono warunki zgrzewania tarcieowego w których odnotowano najniższy stopień degradacji materiału stali 316L UFG w SWC.



Rys. 1. Wpływ procesu zgrzewania na średni wymiar ziarna oraz na wytrzymałość: a) stal drobnoziarnista, b) stal ultradroboziarnista
Fig. 1. The influence of friction welding process on mean grain size and strength: a) fine grain structure, b) ultra fine grain structure

Tablica I. Parametry zgrzewania stali 316L UFG
Table I. Friction welding process parameters of 316L UFG steel

Materiał zgrzewany	Stal 316L UFG
Średnica próbek	6 mm
Prędkość obrotowa wrzeciona	12000 obr/min
Czas tarcia	60 ms
Czas opóźnienia	100 ms
Czas spęczania	3000 ms
Hamowanie napędu	Tak
Ciśnienie na czole próbek podczas tarcia	160 MPa
Ciśnienie na czole próbek podczas spęczania	280 MPa



Rys. 2. Sposób mocowania próbek zgrzewanych, obrotowe wrzeciono – A, nieruchomy uchwyt – B

Fig. 2. Method of fixing welded samples, rotary spindle – A, fixed handle – B

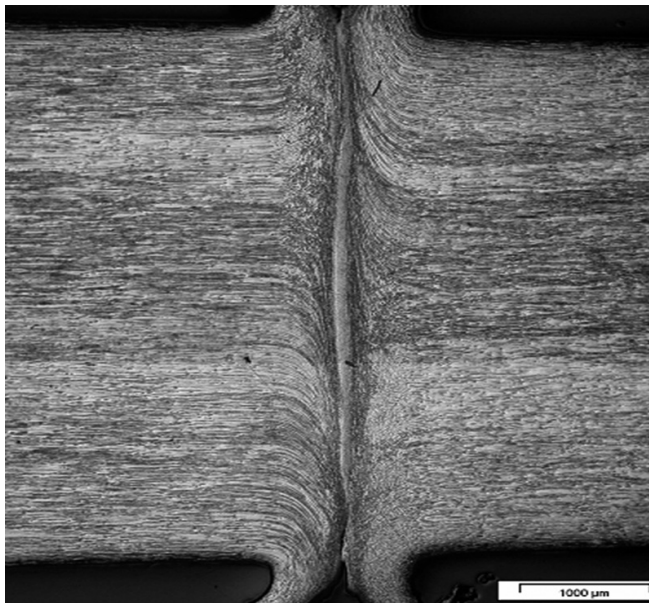
Badania metalograficzne uzyskanych złączy

Rysunek 3 obrazuje mikrostrukturę zgrzeiny powstałej w warunkach najmniejszej degradacji mechanicznych właściwości ultradroboziarnistej struktury. Złącze charakteryzuje stosunkowo wąska strefa wpływu ciepła (rekrytalizacji) o szerokości ok. 0,8 mm, nieznacznie różniąc się strukturą od materiału podstawowego. Pomiar szerokości SWC przedstawiono na rysunku 4. Porównywalna szerokość SWC na całym promieniu złącza świadczy o właściwych relacjach prędkości obrotowej i czasu zgrzewania. Mikrostruktura materiału przylegającego do złącza różni się od materiału rodzimego, jednak szerokość pasma degradacji struktury jest relatywnie mała.

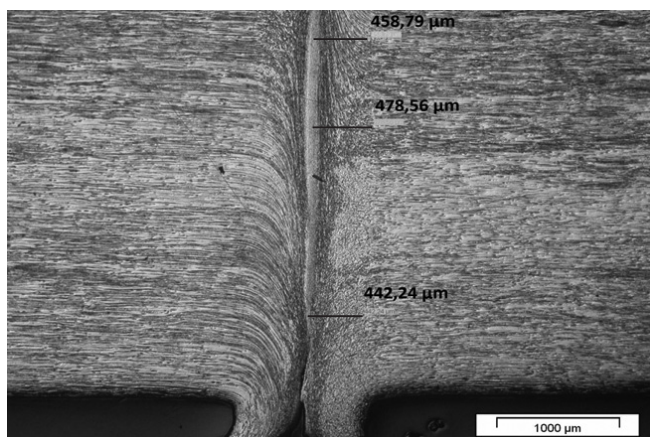
Schemat pomiarów mikrotwardości metodą Vickersa zaprezentowano na rysunku 5. W obrębie złącza wykonano po cztery serie pomiarów przy obciążeniu 100 g, w dwóch obszarach zgrzeiny, pierwszy przy powierzchni zewnętrznej próbki, kolejny w osi prętów. Metodyka badań była następująca: pomiary rozpoczynano od centralnej części złącza, a następnie symetrycznie wykonywano pomiar co 0,1 mm, aż do momentu uzyskania wyników świadczących o końcu strefy wpływu ciepła. Twardość w materiale podstawowym, kształtowała się na poziomie ok. 280÷300 HV0,1.

Wykres z rysunku 6 obrazuje szerokość SWC oraz wskazuje na stopień degradacji (rekrytalizacji) specyficznej ultradroboziarnistej struktury. Przebieg zmian twardości jest zróżnicowany, twardość w poszczególnych strefach

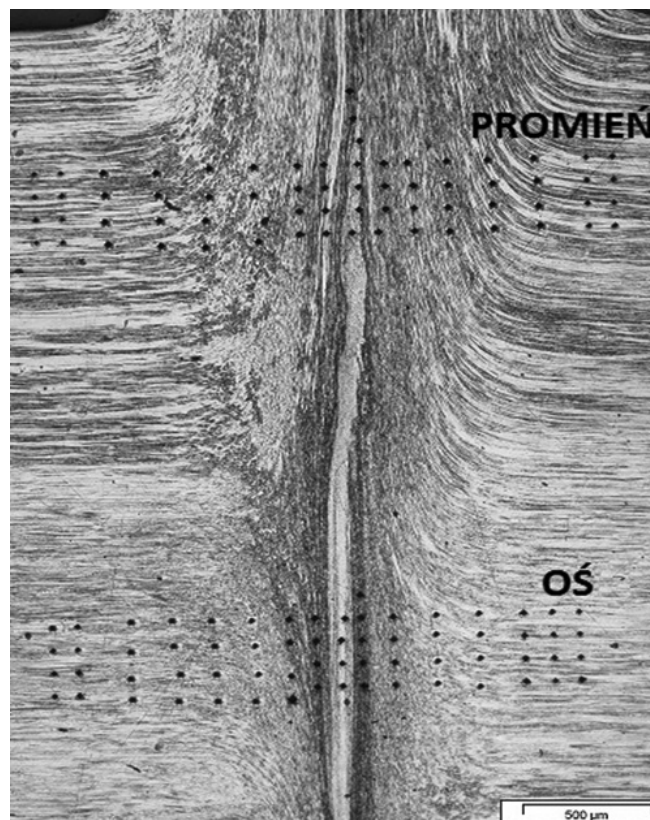
zmienia się od najniższej wartości na poziomie 183 HV 0,1 w osi próbki do wartości charakterystycznej dla materiału rodzimego. Na wykresie przedstawiono średnią wartość z czterech pomiarów z odchyleniem standardowym (rozkład t-studenta z 95% poziomem ufności).



Rys. 3. Mikrostruktura złącza tarcowego stali 316L UFG, trawiona
Fig. 3. Microstructure of friction welded joint of 316L UFG steel, etched

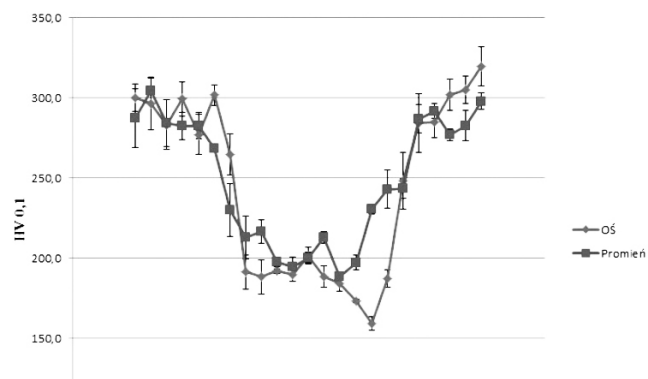


Rys. 4. Pomiar SWC złącza tarcowego stali 316L UFG, trawiona
Fig. 4. HAZ measurements in friction welded joint of 316L UFG steel, etched



Rys. 5. Rozkład punktów pomiarowych w złączu tarcowym stali 316L UFG

Fig. 5. Distribution of measurements points in friction welded joint of 316L UFG steel



Rys. 6. Liniowy rozkład twardości w złączu tarcowym stali 316L UFG
Fig. 6. Linear distribution of microhardness in welded joint of 316L UFG steel

Podsumowanie

Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność stosowania zgrzewania tarcowego jako odpowiedniej metody łączenia materiałów o strukturach silnie rozdrobnionych. Uzyskane wyniki wykazują dobrą relację wytrzymałości otrzymanych zgrzewin do wytrzymałości materiału podstawowego. Nominalnie materiał stali 316L UFG charakteryzuje się właściwościami $R_{p0,2}=1180$ MPa, $R_m=1250$ MPa (wartość średnia z czterech pomiarów). Najlepsze uzyskane złącza zgrzewane uzyskały odpowiednio średnio $R_{p0,2}=780$ MPa, $R_m=890$ MPa.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że spajalność metali o ultradrobnoziarnistej strukturze w kontekście degradacji właściwości jest ograniczona. Należy tak projektować warunki spajania, by ograniczać wpływ ciepła na materiał rodzimy poprzez szybkie nagrzewanie przy możliwie wysokim gradiencie temperatury oraz ograniczaniu energii spajania do niezbędnego minimum.

Literatura

- [1] Hughes D.A. and Hansen N.: High angle boundaries formed by grain subdivision mechanisms, *Acta Materialia*, 9 (45), pp. 3871-3886, 1997.
- [2] Langdon T.G.: The impact of bulk nanostructured materials in modern research, *Reviews on Advanced Materials Science*, 25, pp. 11-15, 2010.
- [3] Kulczyk M., Przybysz S., Skiba J., Pachla W.: Severe Plastic Deformation Induced in Al, Al-Si, Ag and Cu by Hydrostatic Extrusion, *Archives of Metallurgy and Materials*, 59, pp. 59-64, 2014.
- [4] Pachla W., Skiba J., Kulczyk M., Przybysz S., Przybysz M., Wróblewska M., Diduszek R., Stępnik R., Bajorek J., Radomski M., Fařara W.: Nanostructuring of 316L type austenitic stainless steels by hydrostatic extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 615, oo, 116-127, 2014.
- [5] Garbacz H., Lewandowska M., Pachla W., Kurzydłowski K.: Structural and mechanical properties of nanocrystalline titanium and 316LVM steel processed by hydrostatic extrusion, *Journal of Microscopy*, vol. 223, pp. 272-274, 2006.
- [6] Salacinski T., Chmielewski T., Winiarski M., Cacko R., Świercz R.: Roughness of Metal Surface After Finishing Using Ceramic Brush Tools, *Advances in Materials Science*, vol. 18 (1), pp. 20-27, 2018.
- [7] Pietrzak K., Kaliński D., Chmielewski M., Chmielewski T., Włosiński W., Choregiewicz K.: Processing of intermetallics with Al₂O₃ or steel joints obtained by friction welding technique, 12th Conference of the European Ceramic Society – ECerS XII, Stockholm, 2011.
- [8] Ferenc K., Cegielski P., Chmielewski T.: Technika spawalnicza w praktyce, *Poradnik inżyniera konstruktora i technologa*, Verlag Dashofer, Warszawa, 2015.
- [9] Włosiński W., Chmielewski T., Kucharczyk M.: Spajanie tarciove stopów NiAl i FeAl ze stalą węglową St3S, *Przegląd Spawalnictwa* vol. 76 (1), s. 6-12, 2004.
- [10] Hudycz M., Winiarski M., Chmielewski T.: Tarciove metalizowanie ceramiki AlN tytanem, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 87 (10), s. 31-35, 2015.
- [11] Chmielewski T.: Wykorzystanie energii kinetycznej tarcia i fali detonacyjnej do metalizacji ceramiki, *Prace Naukowe PW, seria Mechanika, Zeszyt 232*, s. 1-155. 2012.
-