

Skłonność do pęknięć gorących austenitycznej stali Super 304H przeznaczonej do pracy w podwyższonej temperaturze

Hot crack sensitivity of Super 304H austenitic steel for work at increased temperature

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań skłonności do pęknięć gorących austenitycznej stali Super 304H przeznaczonej do pracy w wysokiej temperaturze. Stal została poddana próbie Transvarestraint, a wyniki tej próby zostały porównane z wynikami próby Transvarestraint dla stali 304. Ustalono, że stal Super 304H wykazuje bardzo dużą skłonność do pęknięć zarówno krystalizacyjnych, jak i segregacyjnych. Ponadto w wysokotemperaturowej strefie wpływu ciepła stwierdzono uszkodzenia granic ziaren o charakterze pęknięć gorących.

Abstract

The paper presents results of hot crack sensitivity of Super 304H austenitic steel designed for work at increased temperature. Steel has been put to the Transvarestraint test. The results of this test were compared with the results of tests for steel 304. It was found that the steel Super 304H is highly sensitive to crystalline and segregation crack. In addition, high temperature heat-affected zone were damaged grain boundaries of a hot cracks.

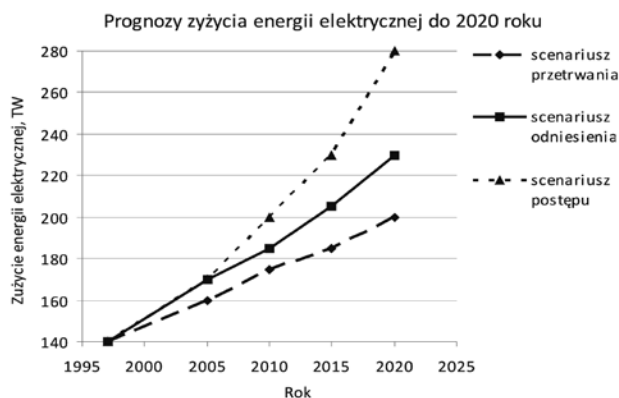
Wstęp

Zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie ciągle wzrasta i jest bezpośrednio związane z rozwojem gospodarczym państw, produkcją przemysłową, energochłonnością oraz zarządzaniem energią. Prognozy zużycia energii elektrycznej do 2020 r. przedstawiono na rysunku 1. Aby zagwarantować bezpieczeństwo energetyczne kraju, w którym elektrownie oparte są na spalaniu surowców kopalnych, niezbędne jest ciągle udoskonalanie oraz zwiększanie sprawności urządzeń energetycznych. Zadanie to może być zrealizowane przez stosowanie coraz nowocześniejszych stali i stopów, które umożliwią podniesienie parametrów pracy kotłów i zapewnią bezpieczną oraz bezawaryjną pracę przez długi czas [1].

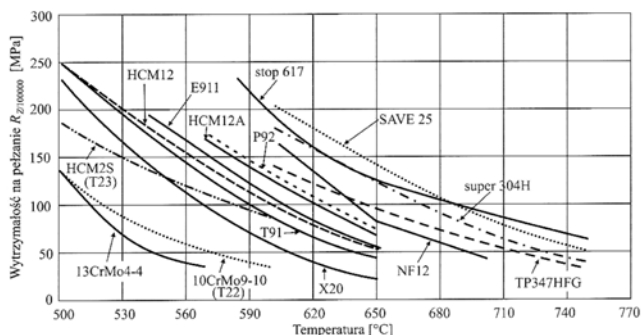
Do wysokotemperaturowych części kotłów w zakresie temperatury pracy powyżej 600°C stosuje się stale

austenityczne i stopy niklu. Niestety konwencjonalna stal 304 (wg PN-EN 10088-1, X5CrNi 18-10) nie spełnia tych wymagań ze względu na zbyt niską odporność na pełzanie. Jedną z najnowocześniejszych stali stosowanych obecnie w przemyśle energetycznym, przeznaczoną do pracy w wysokiej temperaturze jest

Inż. Paweł Zbroja, dr inż. Aneta Ziewiec, prof. dr hab. inż. Edmund Tasak – Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.



Rys. 1. Prognozy zużycia energii elektrycznej do 2020 r. [1]
Fig. 1. Forecasts of electricity consumption by 2020 [1]



Rys. 2. Wytrzymałość na pełzanie stali ferrytycznych, austenitycznych oraz stopów niklu [2]

Fig. 2. Creep strength of ferritic steels, austenitic steels and nickel alloys [2]

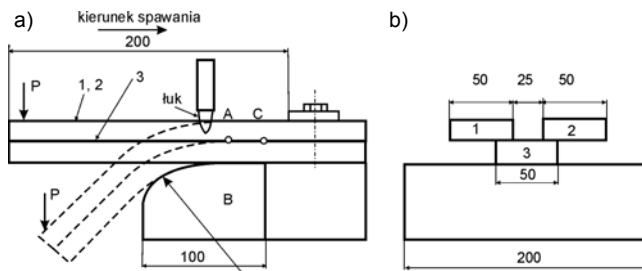
stal Super 304H (X10CrNiCuNb 18-9-3, nr 1.4907). Przez dodanie do składu chemicznego stali 3% miedzi, zwiększenie zawartości węgla oraz dodatku niobu i azotu, podniosła się odporność na pełzanie, a co za tym idzie, możliwość pracy w wysokiej temperaturze. Dodatek miedzi i niobu powoduje znaczne zwiększenie odporności na naprężenia rozciągające w wyniku utwardzenia wydzieleniowego związkami niobu i fazą ϵ zawierającą 92% miedzi. Duża zawartość chromu oraz utwardzenie wydzieleniowe powodują, że stal ta charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na korozję wysokotemperaturową oraz bardzo dobrą odpornością na pełzanie, szczególnie w zakresie temperatury 580÷640°C. Na rysunku 2 przedstawiono wytrzymałość na pełzanie po 100 000 h stali ferrytycznych, austenitycznych oraz stopów niklu. Odporność na wysoką temperaturę jest jednym z najważniejszych wymagań, jakie stawia się wobec rur kotłowych.

Podstawowym problemem spawalności stali austenitycznych jest ich skłonność do pęknięć gorących. Stal Super 304H jest stalą czysto austenityczną, zatem podjęto próbę określenia skłonności do pęknięć gorących tego materiału. Technologiczną próbą, która pozwala określić wpływ odkształceń na skłonność do pęknięć gorących materiału spawanego i materiałów dodatkowych, jest próba Varestraint i Transvarestraint. Charakteryzuje się ona dużą prostotą wykonania oraz ekonomicznością. Pozwala określić wpływ zarówno poszczególnych procesów, jak i parametrów spawania, na tworzenie się pęknięć gorących. Badania wykonywane są na próbkach o wymiarach 220x50xg mm (gdzie: g – grubość materiału), które przetapia się bez materiału dodatkowego lub wykonuje napoinę. Schemat urządzenia oraz zasadę działania przedstawiono na rysunku 3. Podczas dojścia łuku do punktu A sterowane pneumatycznie jarzmo zgina próbkę w dół, odtworząc krzywiznę górnej powierzchni wymiennego bloku matrycowego B.

Do obliczenia wielkości odkształcenia skrajnych włókien próbki wykorzystuje się zależność:

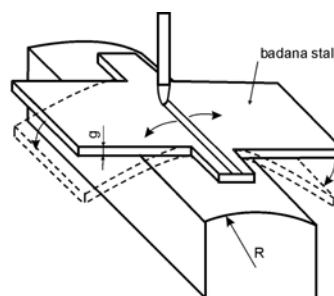
$$\epsilon = g/2R$$

gdzie: g – grubość próbki, mm; R – promień krzywizny górnej płaszczyzny bloku matrycowego, mm.



Rys. 3. Schemat próby Varestraint: a) widok wzdłużny, b) widok poprzeczny [3]

Fig. 3. Schematic diagram of Varestraint test: a) longitudinal view, b) transverse view [3]



Rys. 4. Schemat próby Transvarestraint [3]

Fig. 4. Schematic diagram of Transvarestraint test [3]

Zmieniając bloki matrycowe o różnych promieniach, możemy zmieniać wielkość odkształcenia. Podczas wykonywania próby pod wpływem wywołanych odkształceń pojawiają się pęknięcia w napoinie lub obszarze przyspoinowym materiału rodzimego.

W celu uzyskania oceny technologicznej wytrzymałości materiału należy określić:

- minimalne odkształcenie konieczne do wywołania pęknięcia, tzw. próg pęknięcia,
- sumaryczną długość wszystkich pęknięć,
- maksymalną długość pęknięcia.

Pierwsze dwa kryteria charakteryzują odporność metalu na powstawanie pęknięć gorących, trzecie natomiast określa zakres kruchości wysokotemperaturowej. Wadą tej metody jest to, że odkształceniu ulega nie tylko metal napoiny, ale również materiał rodzimy, co pogarsza dokładność wyników.

Próbie Varestraint charakteryzuje to, że pęknięcia gorące usytuowane są prostopadle do kierunku spawania. W praktyce natomiast częściej spotyka się pęknięcia gorące usytuowane równoległe do kierunku spawania. Dlatego próba ta została zmodyfikowana tak, aby naprężenia rozciągające były prostopadle do osi spoiny (próba Transvarestraint). Schemat przebiegu próby przedstawiono na rysunku 4. Kryteria oceny są takie same jak w próbie Varestraint.

Materiały i przebieg badań

Do badań wykorzystano dwie stale: Super 304H oraz 304, których skład chemiczny przedstawiono w tabelicy I.

Z tych materiałów wykonano 2 serie badań (seria A) na próbkach ze stali Super 304H oraz serię badań

Tablica I. Skład chemiczny (analiza wytopowa) w % masowych stali Super 304H
Table I. Chemical composition (casts study) in % by mass of Super 304H steel

Stal	Zawartość pierwiastków, % masowe											
	C	Si max	Mn max	P max	S max	Cr	Ni	Nb	Cu	N	Al.	B
304H	0,07	0,30	1,00	0,04	0,01	17,0-19,0	7,5-10,5	0,30-0,60	2,50-3,50	0,05-0,12	0,003-0,03	0,001-0,01
304	0,03	1,00	2,00	0,045	0,015	17,0-19,0	9,0-11,0	-	-	0,011 max	-	-

na próbkach ze stali 304 (seria C), które posłużyły do przeprowadzenia próby Transvarestraint.

Podczas próby Transvarestraint kolejne próbki odkształcano na blokach matrycowych o odpowiednim promieniu krzywizny górnej płaszczyzny (R = 135, 38, 30 i 17 mm). Ponadto zostało wykonane samo przepięcie bez odkształcania. Wymiary próbek wynosiły 220x50x4 mm. Powierzchnie próbek (blach) były szlifowane papierami ściernymi w celu usunięcia wierzchniej warstwy tlenków oraz zanieczyszczeń. Przygotowane w ten sposób próbki zostały wykorzystane do badań. Parametry przetapiania podłoża metodą TIG zostały przedstawione w tablicy II.

Badania wykonano na skonstruowanym w Katedrze Metaloznawstwa i Metalurgii Proszków uniwersalnym stanowisku, na którym można przeprowadzać zarówno próbę Varestraint, jak i Transvarestraint (rys. 5).

Tablica II. Parametry przetapiania
Table II. Parameters of melting

Parametr	
Natężenie prądu	80 A
Rodzaj prądu	DC
Średnica elektrody wolframowej	2 mm
Rodzaj gazu ochronnego	argon
Natężenie gazu ochronnego	10 l/min



Rys. 5. Stanowisko do próby Transvarestraint
Fig. 5. The position to carry out Transvarestraint test

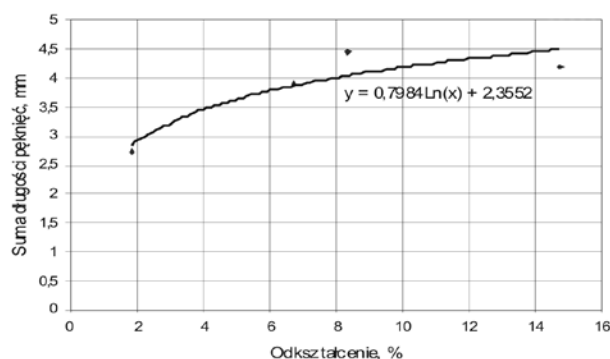
Wyniki badań

W tablicy III zestawiono wyniki pomiarów sumarycznej i maksymalnej długości pęknięć, natomiast na rysunkach 6 i 7 przedstawiono zależność sumarycznej długości pęknięć oraz maksymalnej długości pęknięcia od wielkości przyłożonego odkształcenia. Z danych przedstawionych w tablicy III i na rysunkach 6 i 7 widać, że nawet odkształcenie poniżej 2% powoduje powstanie pęknięć gorących w spoinie stali Super 304H, natomiast w stali 304 nawet ponad 11% odkształcenie nie wywołuje pęknięcia gorącego. Jest to potwierdzeniem faktu, że stale czysto austenityczne (stal Super 304H), w których występuje krzepnięcie austenityczne, są bardzo skłonne do pęknięć gorących krystalizacyjnych, natomiast stale, w których występuje krzepnięcie ferrytyczne (stal 304), nie są skłonne do pęknięć [4].

Po wykonaniu prób zostały przeprowadzone badania wizualne pęknięć, badania mikroskopowe

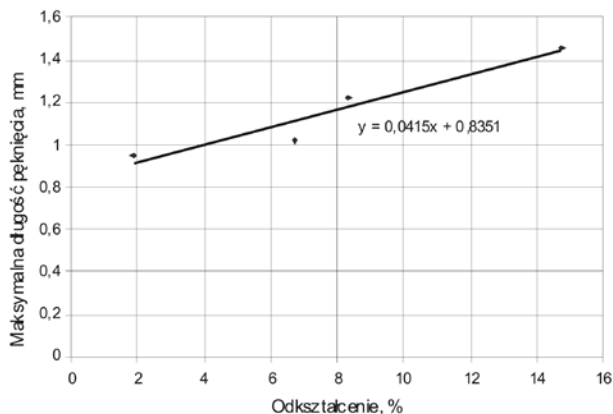
Tablica III. Wyniki próby Transvarestraint
Table III. Results of Transvarestraint tests

Nr próbki	Promień krzywizny bloku matrycowego, mm	Grubość g, mm	Odształcenie ϵ , %	Sumaryczna długość pęknięć, mm	Maksymalna długość pęknięcia, mm
1A	135	5	1,85	3,32	0,95
2A	38	5	6,7	4,84	1,02
3A	30	5	8,33	5,25	1,22
4A	17	5	14,71	5,42	1,46
1C	135	4	1,48	brak	brak
2C	30	4	6,67	brak	brak
3C	17	4	11,76	brak	brak



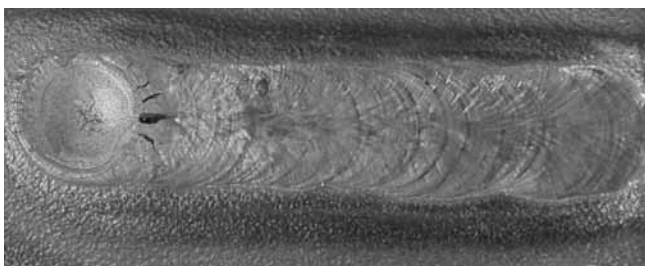
Rys. 6. Zależność sumarycznej długości pęknięć od odkształcenia próbek

Fig. 6. Dependence of the total length of cracks from the strain of samples



Rys. 7. Zależność maksymalnej długości pęknięć od odkształcenia próbek

Fig. 7. The dependence of the maximum length of the cracks from the strain of samples



Rys. 8. Powierzchnia próbki stali Super 304H z widocznymi pęknięciami krystalizacyjnymi (odkształcenie 14,7%)

Fig. 8. Super 304H steel sample surface with visible crystalline cracks (strain 14.7%)



Rys. 9. Powierzchnia próbki stali 304 bez pęknięć (odkształcenie 11,7%)

Fig. 9. 304 steel sample surface without cracks (strain 11.7%)



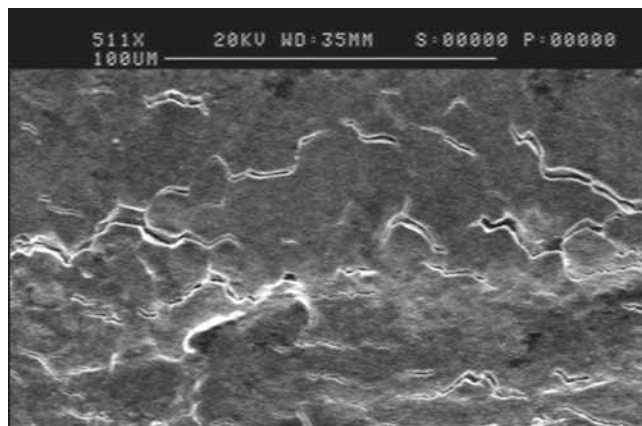
Rys. 10. Pęknięcia gorące spoiny w pobliżu krateru

Fig. 10. Hot cracks of weld near to the crater

powierzchni i przekroi poprzecznych oraz badania powierzchni w elektronowym mikroskopie skaningowym. Przykłady wyglądu powierzchni spoiny stali 304H i 304 pokazano na rysunkach 8 i 9.

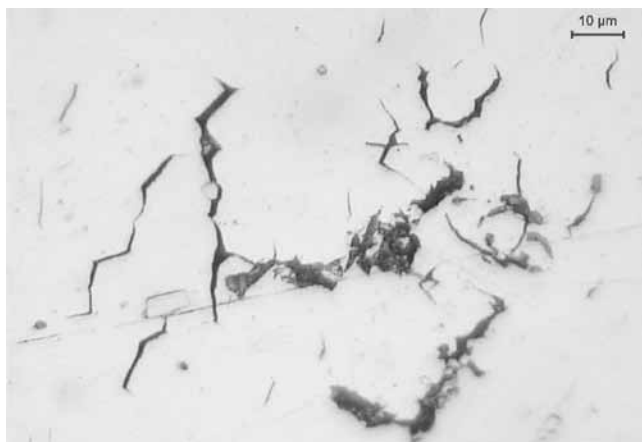
Pęknięcia gorące krystalizacyjne powstają w obszarze dwufazowym ciecz + austenit, a duża długość pęknięcia maksymalnego wynosząca 1,5 mm wskazuje na szeroki zakres temperatury krzepnięcia stali 304H. Pęknięcia gorące na powierzchni spoiny, obserwowane w mikroskopie skaningowym, pokazano na rysunku 10. Rysunek 11 przedstawia powierzchnię w strefie wpływu ciepła z widocznymi powierzchniowymi pęknięciami po granicach ziaren. Aby stwierdzić, czy są to pęknięcia cienkiej warstwy tlenków, czy pęknięcia w materiale, wykonano zglądy równoległe oraz prostopadle do powierzchni próbki. Przykłady pokazane na rysunkach 12 i 13 wskazują, że są to drobne pęknięcia lub uszkodzenia granic ziaren wypełnione tlenkami na głębokość porównywalną z wielkością ziarna stali (15÷20 μm). Mechanizm powstawania tych pęknięć będzie wyjaśniony podczas dalszych badań.

Oprócz pęknięć krystalizacyjnych w spoinie i pęknięć powierzchniowych w SWC, w badanej stali stwierdzono pęknięcia segregacyjne w SWC, które w obecności naprężeń rozciągających przechodzą do spoiny.



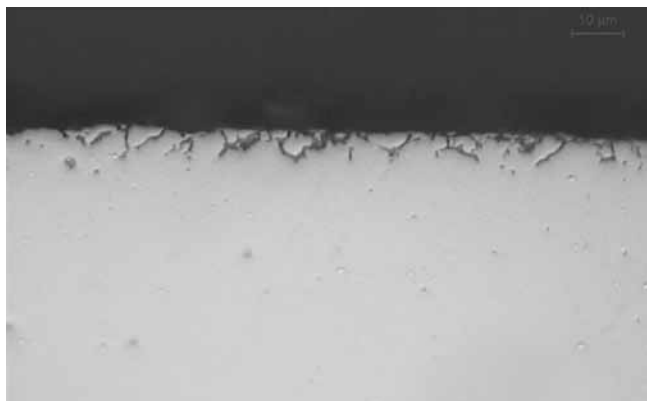
Rys. 11. Pęknięcia gorące po granicach ziaren w SWC

Fig. 11. Hot cracks in the grain boundaries in the HAZ



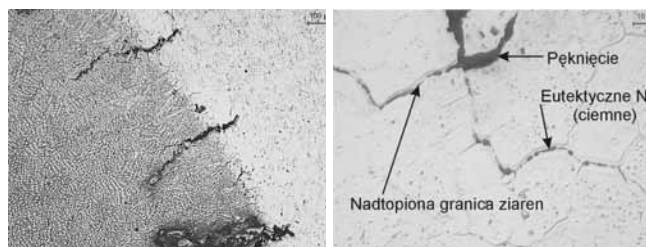
Rys. 12. Uszkodzenia granic ziaren, widoczne na zglądzie wykonanym równoległe do powierzchni blachy (zgląd nietrawiony)

Fig. 12. Damage of grain boundaries visible on the metallographic specimen parallel to the surface of the plate (not etched)

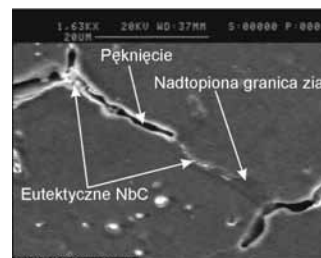


Rys. 13. Uszkodzenia granic ziaren w SWC widoczne na zglądzie prostopadłym do powierzchni blachy (zgląd nietrawiony)

Fig. 13. Damage of grain boundaries in the SWC visible on the metallographic specimen perpendicular to the sheet surface (not etched)



Nadtopiona granica ziaren



Rys. 14. Pęknięcia segregacyjne w SWC

Fig. 14. Segregation cracks in the SWC

Przykłady tych pęknięć pokazano na rysunku 14. Pęknięcia segregacyjne powstają przy węglkach niobu, na których zatrzymała się migrująca granica ziaren. W pobliżu węglaka niobu zachodzi nadtopianie sąsiadującego z nim austenitu i powstaje ciecz bogata w niob o niskiej temperaturze krzepnięcia [4]. Naprężenia powodują

rozpływanie się cieczy po granicach ziaren. Zmniejszenie objętości cieczy przy krzepnięciu i powstające odkształcenia wywołane skurczem powodują powstawanie pęknięć gorących, tzw. segregacyjnych. Wewnątrz pęknięć gorących resztkę cieczy bogatej w niob krzepnie w postaci eutektyki.

Podsumowanie

Badania wykazały, że stal austenityczna Super 304H jest skłonna do pęknięć krystalizacyjnych w spoinie oraz pęknięć segregacyjnych w SWC. Duża skłonność do pęknięć krystalizacyjnych jest wynikiem składu stali, w której występuje krzepnięcie austenityczne. Ponadto obecność silnie segregującego na granicach ziaren niobu znacząco obniża temperaturę końca krzepnięcia, co przy znacznych odkształceniach skurczowych sprzyja pękaniu.

Drugim rodzajem pęknięć są pęknięcia segregacyjne powstające w strefie wpływu ciepła i rozwijające się w kierunku spoiny. Ich przyczyną jest nadtopianie austenitu wokół węglków niobu i przy ponownym krzepnięciu tworzenie niskotopliwych eutektyk austenit + NbC. Zmniejszenie objętości cieczy

przy krzepnięciu i powstające odkształcenia wywołane skurczem powodują powstawanie gorących pęknięć segregacyjnych. Wewnątrz pęknięć gorących resztkę cieczy bogatej w niob krzepnie w postaci eutektyki.

Trzecim rodzajem pęknięć w strefie wpływu ciepła są powierzchniowe uszkodzenia (pęknięcia) wzdłuż granic ziaren do głębokości porównywalnej z wielkością ziarna (15÷20 μm). Mechanizm ich powstawania będzie wyjaśniony w czasie dalszych badań.

Przeprowadzone badania wskazują, że stal Super 304H może stwarzać problemy w procesie wytwarzania konstrukcji i należy mieć świadomość możliwości wystąpienia niezgodności spawalniczych, niekiedy trudnych do ujawnienia.

Literatura

- [1] Hernas A.: Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [2] Brózda J., Zeman M., Pasternak J.: The first supercritical power unit in Poland. Weldability evaluation of new martensitic chromium steels with tungsten additions and properties of wel-

ded joins. Proceedings of the 7th Liege Conference, 2000, 1711-1720 (część III).

- [3] Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych, t.1, Spawalność stali, Wydawnictwo JAK, Kraków 2009.
- [4] Tasak E.: Metalurgia spawania, Wydawnictwo JAK, Kraków 2008.

Wyniki prezentowanych badań zostały przedstawione w referacie pt. „Spawalność stali austenitycznych, przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach” wygłoszonym przez inż. Pawła Zbroję na XLVIII Sesji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego AGH 2011 w Sekcji Inżynieria Spajania, który został wyróżniony I nagrodą. Opiekun naukowy referatu – prof. dr hab. inż. Edmund Tasak.

Badania wykonano w ramach pracy statutowej nr 11.11.110.790