

Zgrzewanie oporowe w praktyce inżynierskiej

PAWEŁ LONKWIC, IRENEUSZ USYDUS

Zgrzewanie oporowe, zarówno punktowe jak i liniowe wykorzystywane jest w wielu branżach. Z uwagi na krótki czas operacji obserwuje się szybki wzrostu liczby produkowanych detali tą technologią łączenia. Można ją stosować do łączenia materiałów, tzw. jednoimiennych oraz dwuimiennych (blach o różnych grubościach). W artykule przedstawiono analizę informacji literaturowych oraz rezultaty badań eksperymentalnych z tego zakresu, na podstawie których wskazano czynniki determinujące jakość połączeń wykonanych tą technologią.

Wstęp

Zgrzewanie oporowe zarówno punktowe jak i liniowe wykorzystywane jest w wielu branżach, wytwarzających od małych półproduktów stosowanych w AGD począwszy, na produktach dla branży motoryzacyjnej skończywszy. Rozwój tej technologii łączenia przyczynił się do wzrostu liczby produkowanych detali z uwagi na krótki czas operacji. Technologię tę można wykorzystywać do łączenia materiałów tzw. jednoimiennych oraz dwuimiennych, czyli blach o różnych grubościach.

Artykuł został napisany pod wpływem zaistniałej reklamacji jednego z klientów, który zakupił metalową, zgrzewaną skrzynkę, która uległa zniszczeniu przy lekkim uderzeniu. Po całkowitym rozłożeniu skrzynki oraz po zdjęciu powłoki lakierniczej na powierzchni detali w miejscach zgrzein pokazała się rdza, a na powierzchni blachy widoczne były rysy powstałe na skutek mechanicznego czyszczenia. Stan taki wskazywał na wykorzystanie materiału, który wcześniej posiadał korozję powierzchniową.

Ze względów oczywistych w artykule, nie podano nazwy zakładu produkcyjnego ani nazwy oraz wymiarów gotowego wyrobu, który uległ uszkodzeniu.

Zgrzewanie oporowe

W procesie zgrzewania oporowego, metale są łączone bez stosowania materiałów dodatkowych. Przez obszar, w którym ma powstać złącze, przepuszczany jest prąd elektryczny, doprowadzany za pomocą wywierających nacisk elektrod. Ilość generowanego ciepła zależy, m.in. od oporności elektrycznej styku łączonych elementów, co ma istotny wpływ na przebieg procesu.

Do podstawowych odmian technologii zgrzewania oporowego zalicza się:

- zgrzewanie punktowe,
- zgrzewanie garbowe,
- zgrzewanie liniowe,
- zgrzewanie doczołowe zwarciove,
- zgrzewanie doczołowe iskrowe.

Niezależnie od odmiany łączenia, ważną zasadą jest to, aby łączony materiał nie posiadał wad typu ogniska korozji. W literaturze zgrzewanie oporowe opisywane jest w trzech głównych zakresach. Pierwszy dotyczy problematyki łączenia w zastosowaniach do różnych dziedzin inżynierii, drugi automatyzacji, a trzeci modelowania numerycznego.

W artykule [1] przedstawiono klasyfikację procesu zgrzewania oporowego. Autor opisał w nim możliwość robotyzacji tego procesu, jego zalety oraz wady, a także rozwiązania sprzętowe oferowane na rynku. Opisał również stanowisko do badania drgań narzędzia w zrobotyzowanym procesie zgrzewania.

Autorzy w publikacji [2] przedstawili najistotniejsze elementy mające wpływ na trwałość eksploatacyjną elektrod nasadkowych stosowanych do zgrzewania ocynkowanych, karoseryjnych blach stalowych. Przedstawili wyniki badań zmian mikrostruktury zgrzein łączonych blach, jak też mikrostruktury elektrod nasadkowych przed i po zakończeniu eksploatacji.

W kolejnym artykule [3] przedstawiono możliwości zrobotyzowania linii technologicznych wykorzystujących procesy zgrzewania: oporowego, liniowego oraz

* Dr inż. Paweł Lonkwic, plonkwic@gmail.com, mgr inż. Ireneusz Usydus, PWSZ Chełm, Instytut Nauk Technicznych i Lotnictwa, ul. Poczтовая 54, 22-100 Chełm.

garbowego. Autorzy prezentują koncepcje oraz przykłady zrobotyzowanych stanowisk wykorzystujących technologię zgrzewania, a także opisują parametry mające wpływ na zwiększenie wydajności produkcji z zastosowaniem robotów zgrzewających. W artykule znalazły się również wskazówki jakimi należy się kierować przy konfigurowaniu stacji zgrzewających.

W publikacji [4] Autorzy przedstawili sposób doboru urządzeń do zgrzewania oporowego punktowego. Na podstawie przeglądu literatury stwierdzili, że nie istnieje obiektywna metoda wspomagająca decyzję zakupu takich zgrzewarek. Do rozwiązania problemu zaproponowali zastosowanie metod analizy skupień. Zgromadzili i opracowali dane diagnostyczne opisujące 35 typów zgrzewarek oporowych punktowych, a następnie przeprowadzili ich klasyfikację metodami Warda i k-średnich. Na podstawie porównania wyników Autorzy wykazali, że analiza skupień może być stosowana jako wstępna metoda wspomagania decyzji zakupu urządzeń do zgrzewania oporowego punktowego.

W publikacji [5] zaprezentowano wyniki analiz numerycznych procesu zgrzewania oporowego punktowego w odniesieniu do: wybranych grubości blach poddawanych łączeniu, promienia krzywizny powierzchni roboczej elektrody oraz siły ściskania elektrody. Na podstawie dwustronnego zgrzewania punktowego dwóch blach ze stali DC04, Autor zaprezentował szerokie możliwości analityczne nowoczesnego programu Visual Weld oraz korzyści jakie daje inżynierom zastosowanie numerycznych technik komputerowych.

W publikacji [6] Autor opisał stosowane aktualnie w przemyśle technologie spawania termitowego i zgrzewania oporowego iskrowego szyn trakcyjnych kolejowych dużej prędkości oraz nowoczesne bainityczne stale niskostopowe, bezwęglkowe, zapewniające dobre własności mechaniczne i tribologiczne szyn. W celu znacznego zwiększenia jakości złączy doczołowych szyn i ekonomiczności procesu łączenia zaproponowano dwie innowacyjne technologie łączenia szyn: spawanie laserowe oraz zgrzewanie tarciove wibracyjne.

Autorzy w publikacji [7] opisali punktowe zgrzewanie tarciove z przemieszczaniem, będące jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym. Możliwość łączenia elementów wykonanych ze stopów aluminium pozwala na stosowanie tej metody przy produkcji struktur lotniczych, przy jednoczesnym zmniejszeniu pracochłonności, kosztów i ich ciężaru, zachowując porównywalne lub lepsze parametry wytrzymałościowe w porównaniu do klasycznych metod łączenia. Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń według Autorów wymaga jednak starannego doboru parametrów procesu zgrzewania, tj.: prędkości obrotowej narzędzia, zagłębienia narzędzia oraz czasu zgrzewania. W artykule zaprezentowano wyniki badań procesu zgrzewania blach aluminiowych 7075-T6 o grubości 1,8 i 0,8 mm. Testy zgrzewania przeprowadzono na przeznaczony do tego celu maszynie, natomiast badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę ścinania. W końcowej części artykułu, Autorzy dokonali porównania nośności połączenia i budowy spoiny uzyskanej tą metodą ze zgrzeiną wykonaną metodą zgrzewania oporowego.

W publikacji [8] Autorzy przedstawili wyniki badań, w których porównywali wartości naprężeń wewnętrznych będących w szynach kolejowych i w zgrzewanych połączeniach tych szyn. Autorzy badali przebieg naprężeń w złączach szynowych po zgrzewaniu oraz po badaniach zmęczeniowych tych połączeń. W badaniach zastosowali tensometryczną metodę niszczącą według normy

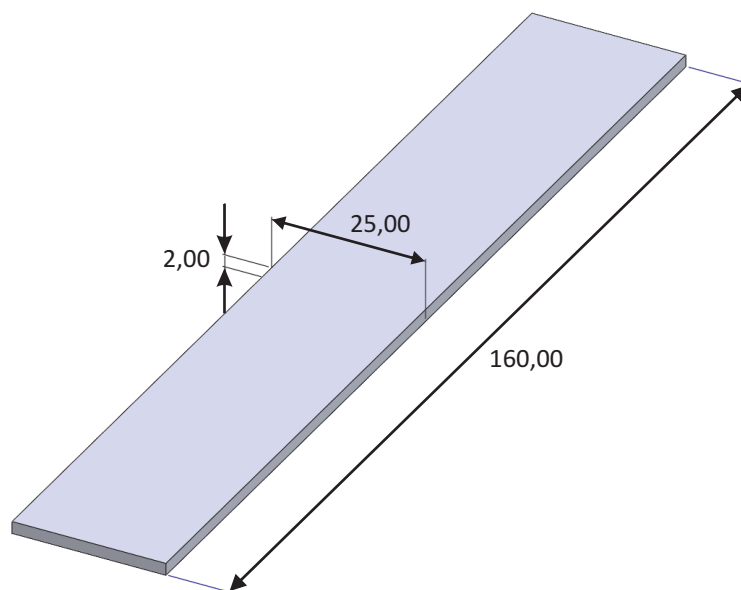
PN EN 13674-1:2011+A1:2017. Do badań użyte zostały szyny wykonane ze stali w gatunku R260 oraz gatunku R350HT.

W publikacji [9] Autorzy zaprezentowali modelowanie procesu zgrzewania punktowego, który następnie porównali z wynikami badań rzeczywistych. Symulacje procesu zgrzewania związane są z koniecznością uzyskania odpowiednich parametrów otrzymywanych na drodze doboru parametrów technologicznych zgrzein. Przedstawiony artykuł porusza problematykę przygotowania próbek i symulacji zbliżonych do wykonywanych na potrzeby rzeczywistych procesów przemysłowych.

W artykule [10] Autorzy opisali połączenia zgrzewane punktowo stosowane w budowie karoserii nowoczesnych pojazdów samochodowych. W artykule zawarto wyniki badań ultradźwiękowych połączeń zgrzewanych, wykonanych przy różnych wartościach prądu zgrzewania. Wykorzystano głowice ultradźwiękowe o częstotliwości 20 MHz z wodną linią opóźniającą. Połączenia poddano weryfikacji badaniami niszczącymi, jakimi było wykonanie próby ścinania na maszynie wytrzymałościowej oraz pomiar średnicy jądra zgrzeiny.

Badania własne

Zgodnie tym, co zostało zawarte na początku artykułu, badaniom poddano próbki o wymiarach pokazanych na rys. 1, które wykonane zostały z blachy zimno-



Rys. 1. Wymiary próbek stalowych użytych do badań



Rys. 2. Próbkę wykonane z blachy S235 w stanie nieskorodowanym



Rys. 3. Próbkę wykonane z blachy S235 w stanie skorodowanym

walcowanej gatunku S235, w dwóch stanach powierzchni:

- a) nieskorodowanym, rys. 2,
- b) skorodowanym, rys. 3.

Z uwagi na to, że znalezienie materiału z zaawansowaną w pewnym stopniu korozją na powierzchni blachy jest dość kłopotliwe, w przygotowanych prób-

kach korozję uzyskano za pomocą procesu starzenia w komorze klimatycznej stosując następujące cykle:

- 5 dni temp 23°C wilgotność 50%;
- 5 dni w wodzie temp 20°C;
- 1 dzień temp 80°C;
- 5 dni w temp 70°C w nasyconej wilgoci kataplazmą.

Cykle zastosowane do uzyskania korozji dobrano na podstawie wcześniejszych doświadczeń oraz opisów zawartych w przykładach instruktażowych komory klimatycznej. Otrzymane próbki uzyskane na podstawie powyższych cykli pokazane zostały na rysunkach 3 i 4.

Dalsze prace miały na celu doprowadzenie do zgrzania przygotowanych próbek oraz oceny ich wytrzymałości poprzez zrywanie na maszynie wytrzymałościowej. Przygotowanie próbek wymagało w pierwszej kolejności, usunięcia korozji powstałej na powierzchni. W związku z tym, skorodowane próbki oczyszczono (w miejscach, gdzie miała być zgrzeina) za pomocą papieru ściernego do stanu umożliwiającego ich zgrzanie, co pokazano na rys. 5, a następnie poddano zgrzewaniu zgodnie ze schematem wymiarowym pokazanym na rysunku 6.



Rys. 4. Powiększenie powierzchni próbki w stanie skorodowanym

W ramach przeprowadzonych badań dokonano także próby zgrzewania próbek bez usuwania korozji oraz próbek czyszczonych jednostronnie. Dla blach czyszczonych jednostronnie wykonano próby zgrzewania powierzchnią oczyszczoną do wewnątrz. Zarówno próbki oczyszczone jednostronnie jak

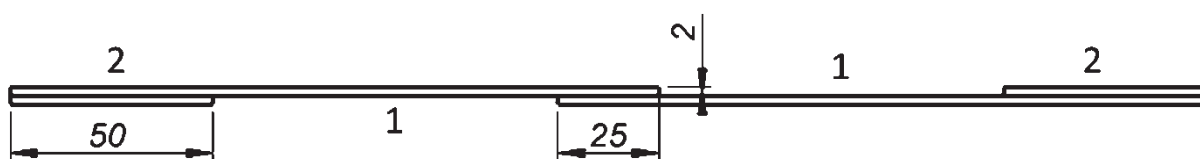
i nieoczyszczone nie wykazywały tendencji do połączenia z uwagi na brak przepływu prądu.

Łącznie przygotowano po 5 próbek, które poddano zgrzewaniu oporowemu na

zgrzewarce typu TE90 Mark II. Do zgrzewania wykorzystano elektrody wykonane z mosiądzu o średnicy części zgrzewającej 7,5 mm. Dobór parametrów zgrzewania został opracowany na drodze doświadczalnej, ponieważ zalecane parametry



Rys. 5. Skorodowane próbki z widocznymi zarysowaniami po procesie oczyszczania



Rys. 6. Schemat przygotowania próbek do oceny ich wytrzymałości



Rys. 7. Zgrzane próbki uzyskane z materiału bez korozji



Rys. 8. Zgrzane próbki uzyskane z materiału z korozją

zgrzewania blach o grubości 2 mm nie dawały pozytywnych rezultatów (próbki nie łączyły się w taki sam sposób jak próbki bez korozji).

Zgrzewanie przygotowanych próbek pozwoliło na uzyskanie zgrzein o średnicach w zakresie $9,5 \div 10,3$ mm.

Na rysunkach 7, 8 i 9 pokazano kolejno: zgrzane próbki z materiału bez korozji, zgrzane próbki ze skorodowaną, oczyszczoną powierzchnią oraz powiększenie zgrzeiny otrzymanej na skorodowanej próbce.

Pierwsze oględziny zgrzanych próbek, uwiarydliły różnice w strukturze zgrzeiny próbek z korozją w stosunku do zgrzein uzyskanych dla próbek bez korozji. Różnica dotyczyła kolorystyki oraz porowatości zgrzeiny. W przypadku próbek z korozją, otoczka zgrzeiny oraz sama zgrzeina była jaśniejsza, co jest prawdopodobnie wynikiem pozostałości korozji na powierzchni blachy.

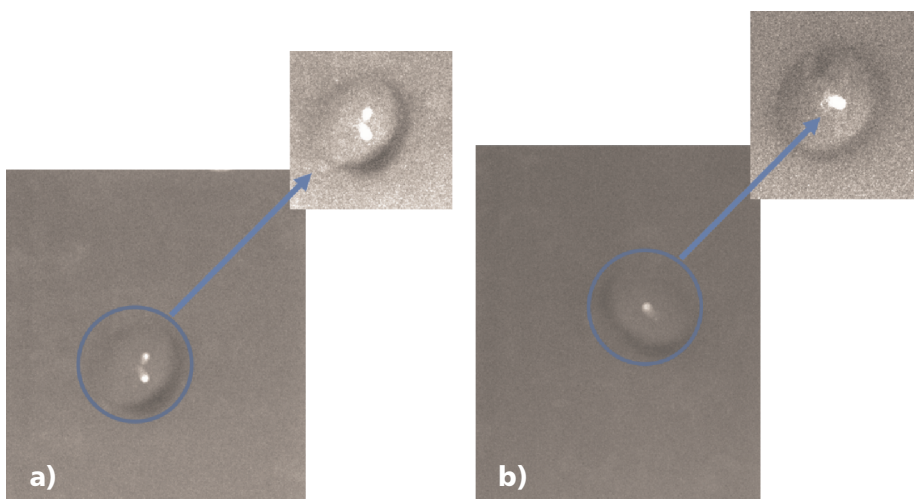
W dalszych badaniach wykonano zdjęcia rentgenowskie losowo wybranych próbek przy użyciu aparatu GE Phoenix V/Tome/XS z następującymi parametrami:

- napięcie – 130 kV,
- natężenie – 100 mA,
- czas – 500 ms.

Na rysunku 10 pokazane zostały zdjęcia zgrzein: na rysunku 10a próbka bez



Rys. 9. Zgrzeina uzyskana dla próbki skorodowanej



Rys. 10. Zdjęcia rentgenowskie próbek: a) – bez korozji, b) – z korozją

korozji oraz na rysunku 10b próbka z korozją. Szczególną uwagę zwraca środkowa część zgrzeiny, widoczna na zdjęciach jako „biały obszar”. W przypadku próbki skorodowanej prawdopodobnie nastąpiło rozdzielenie strumienia prądu, które widzimy jako dwa „białe obszary”.

Z uwagi na główny cel badań dotyczący oceny wpływu korozji na wytrzymałość połączenia, w dalszych badaniach nie dokonywano pomiarów rozłożenia „białych obszarów” względem środka zgrzeiny.

W następnym kroku wykonano ocenę wytrzymałości połączeń na maszynie wytrzymałościowej typu Hungta HT-2402s. Badania wytrzymałości wykonano jako próbę ścinania z prędkością 10 m/min, jako średnia z 5 pomiarów wykonanych po sobie.

Przedstawione na rysunkach 11 i 12 wykresy pokazują wyraźne zmniejszenie wytrzymałości połączenia zgrzewanego

w przypadku użycia blachy z tzw. w żargonie produkcyjnym odpadu użytkowego. Na podstawie średniej z pięciu prób stwierdzono, że w przypadku przypadku blachy w stanie bez korozji wytrzymałość połączenia wynosiła około 9300 N, natomiast w przypadku blachy z korozją powierzchniowa wartość wyniosła około 8300 N, a więc około 90% pierwszej wartości. Na tej podstawie można stwierdzić, że na jakość połączenia ma wpływ stan powierzchni blachy.

Dyskusja wyników

W powyższych rozważaniach należy uwzględnić to, że przygotowanie próbek z korozją było wywołane w sposób kontrolowany. W opisanym we wstępie przypadku, użyta blacha była zapewne przypadkowa, a jej oczyszczenie było podyktowane koniecznością jej wykonania bez żadnej kontroli.

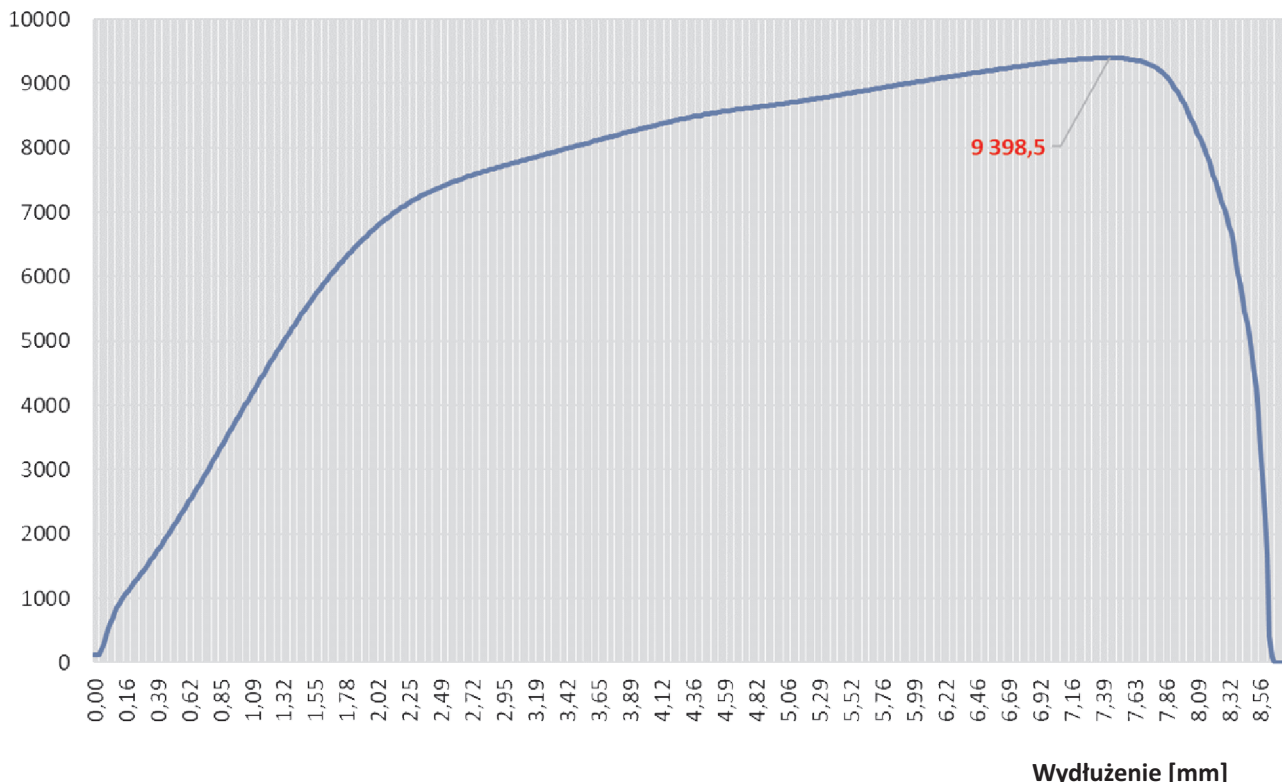
Niewątpliwie korozja negatywnie wpływa na walory użytkowe nie tylko pod kątem wizualnym, ale również wytrzy-

małościowym, co miało miejsce u jednego z kupujących.

W procesie produkcyjnym, wykorzystanie materiału jest podyktowane głównie kryterium ekonomicznemu. W związku z tym, każde wykorzystanie, nawet najmniejszego fragmentu materiału jest czynnikiem wpływającym na oszczędności. W przedstawionym przykładzie pojawia się pytanie czy za każdą cenę należy wykorzystywać materiał? Rozsądek odpowiada, że nie – nikt z kupujących nie chce, aby zakupiony towar był wadliwy, a sprzedający nie chce ponosić dodatkowych kosztów objętych reklamacjami.

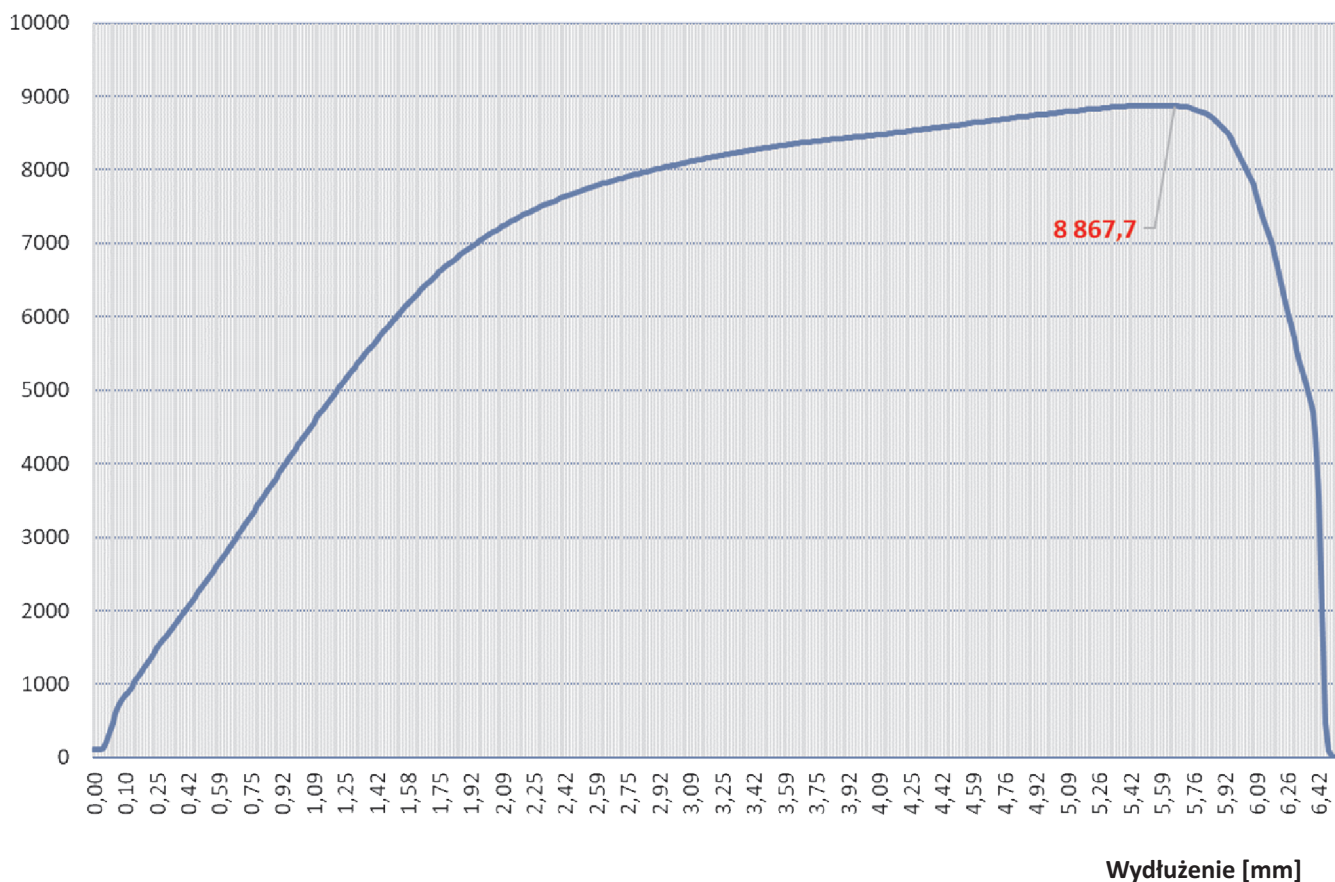
W przedstawionym przykładzie, pogorszenie wytrzymałości połączenia zgrzewanego przyczyniło się do powstania reklamacji na zakupione obudowy. Badania pokazały, że brak staranności w oczyszczeniu materiału z ognisk korozji może prowadzić do znacznego zmniejszenia wytrzymałości połączenia, co prawdopodobnie miało miejsce.

Siła [N]



Rys. 11. Wykres rozciągania próbek bez korozji

Siła [N]



Rys. 12. Wykres rozciągania próbek z korozją

Przeprowadzone badania są również przydatne w przypadku napraw, w których wykorzystywany jest proces zgrzewania, a występują ślady korozji. Skorodowane powierzchnie muszą zostać oczyszczone dwustronnie w stopniu pozwalającym na wykonanie procesu. W przypadku powierzchni, które nie mogą zostać dokładnie oczyszczone ze względów np.: konstrukcyjnych lub braku możliwości demontażu łączonych elementów, należy się spodziewać pogorszenia wytrzymałości.

W celu szerszej identyfikacji problemu, w kolejnych badaniach należy dokonać doboru parametrów technologicznych zgrzewania w większym zakresie oraz wykonać rentgenowskie badania nieniszczące, mające na celu identyfikację jakości zgrzein.

Literatura

1. Borys S.: Badanie drgań narzędzia w zrobotyzowanym procesie zgrzewania. *Mechanik*, vol. 89, nr 7/2016, s. 646-647.
2. Głuchowski W., Rdzawski Z., Kwaśniewski P., Knych T., Sobota J., Maleta M., Domagała-Dubiel J., Boczek S.: Elektrody nasadkowe do zgrzewania oporowego blach stalowych. *Materiały konferencyjne MTS Conference, Gliwice – Zawiercie 2019*, s.78-90.
3. Kaczmarek W., Panasiuk J.: Zrobotyzowane procesy zgrzewania. *Napędy i Sterowania 2019*, vol. 11, s. 85-89.
4. Kędziorska M., Świerczyńska A., Rogalski G., Fydrych D.: Selection of resistance spot-welding machines with the use of cluster analysis. *Welding Technology Review*, vol. 90, No. 5/2018, s. 80-86.
5. Kik T.: Numerical Analyses in the Spot Resistance Welding Process. *Biuletyn*

Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, nr 5-6/2019, s. 56-67.

6. Klimpel A.: Innowacyjne technologie spawania i zgrzewania złączy doczołowych szyn ze stali HSS trakcyjnej dużej prędkości. *Stal, Metale & Nowe Technologie*, nr 5-6/2019, s. 126-130.
7. Kluz R., Kubit A., Wydrzyński D.: Zgrzewanie punktowe blach ze stopu aluminium 7075-T6. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, nr 2/2017, s. 56-60.
8. Mikłaszewicz I., Siwiec J.: Badanie naprężeń wewnętrznych w złączach zgrzewanych szyn kolejowych. *Railway Report*, z. 185, 2018, s. 31-37.
9. Motyka M., Wróbel I.: Analiza MES procesu zgrzewania elektrycznego oporowego. *Zeszyty naukowe ATH, s. Engineering*, vol. 17, z. 1/2021, s. 193-209.
10. Strumiński Z., Ulbrich D., Kowalczyk J., Stępek D.: Ultradźwiękowa ocena połączeń zgrzewanych punktowo. *Nondestructive Testing and Diagnostics*, vol. 3, No. 4/20178, s. 20-23.