

Ocena cech wizualnych zgrzein połączeń zakładkowych

PAWEŁ LONKWIC, IRENEUSZ USYDUS *

W artykule przedstawiono badania, których celem była ocena jakościowa zgrzein punktowych złączy zakładkowych wykonanych przy zmianie parametru natężenia prądu. Wykonane zgrzeiny poddano pomiarom geometrycznym za pomocą mikroskopu różnicowania ogniskowego, prześwietleniom RTG oraz ocenie wytrzymałościowej poprzez ich zrywanie. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że zmiana nawet tylko jednego parametru zgrzewania może znacząco wpływać na jakość uzyskanych zgrzein, co w niektórych wyrobach może powodować wzrost kosztów produktów finalnych.

Wstęp

Zgrzewanie oporowe zarówno punktowe jak i liniowe wykorzystywane jest w wielu branżach oraz przedsiębiorstwach. Rozwój tej technologii przyczynił się do wzrostu liczby produkowanych detali z uwagi na krótki czas operacji a także dzięki możliwości łączenia materiałów tzw. jednoimiennych oraz dwuimiennych, czyli elementów o różnych grubościach.

W artykule opisane zostały wyniki badań własnych jednoimiennych zakładkowych złączy zgrzewanych. Analizie poddano połączenia wykonane z blachy stalowej w gatunku S235. W ramach badań wykonano pomiary geometryczne zgrzein za pomocą suwmiarki oraz mikroskopu różnicowania ogniskowego Alicona. Wykonano ich prześwietlenia rentgenowskie oraz dokonano zrywania próbek na maszynie wytrzymałościowej. Ocenie

poddano wpływ natężenia prądu zgrzewania na jakość wizualną zgrzein.

Przeгляд literatury

Zgrzewanie oporowe będące technologią szeroko wykorzystywaną w wielu dziedzinach jest przedmiotem wielu badań oraz tematem licznych publikacji. Autorzy prezentują wyniki badań własnych nie tylko pod kątem łączenia materiałów, ale również prezentują własne konstrukcje zgrzewarek, przeznaczonych do łączenia wybranych materiałów lub elementów o specjalnych kształtach oraz przeznaczeniu.

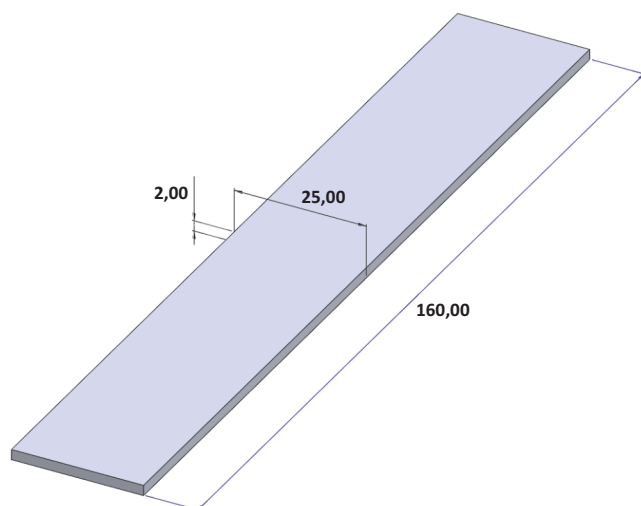
W artykule [1] przedstawiono szczegółową klasyfikację procesu zgrzewania oporowego oraz istniejące rozwiązania sprzętowe. Na podstawie przeprowadzonej klasyfikacji, wskazano metody zgrzewania będące szczególnie podatne na możliwości ich zrobotyzowania.

Opisano również stanowisko do badania drgań narzędzia w zrobotyzowanym procesie zgrzewania oraz przedstawiono wyniki badań w tym zakresie.

W kolejnej publikacji [3] porównano właściwości połączeń wykonanych metodą klinczowania oraz punktowego zgrzewania oporowego. Do badań wykorzystano blachy stalowe w gatunkach: HCT600X+ZF, HCT600X+Z oraz HX420LAD+Z. Wyniki prób wytrzymałości złączy wykazały, że nośności złączy klinczowanych zawierały się w zakresie od 3900 N do 5900 N, a złączy zgrzewanych – od 12000 N do 19500 N.

W publikacji [4] opisano punktowe zgrzewanie tarciove z przemieszaniem, 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. Stwierdzono, że zapewnienie stałości parametrów użyt-

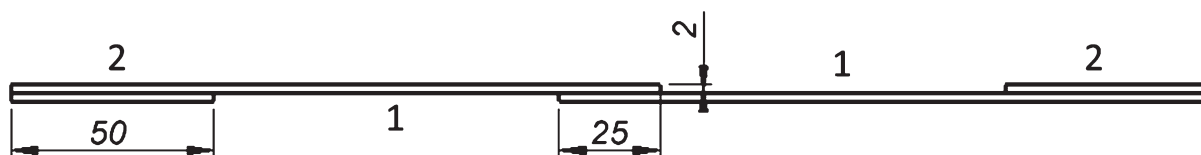
* Dr inż. Paweł Lonkwic, plonkwic@gmail.com, mgr inż. Ireneusz Usydus, PWSZ Chełm, Instytut Nauk Technicznych i Lotnictwa, ul. Poczтовая 54, 22-100 Chełm.



Rys. 1. Wymiary próbek stalowych użytych do badań [6]

wykorzystania. W badaniach użyto materiały w formie blachy stalowej S235, natomiast ocena złączy była wykonana na podstawie testów przeprowadzonych na maszynie wytrzymałościowej.

Autorzy w artykule [7] zaprezentowali wyniki badań, w których porównywali wartości naprężeń wewnętrznych w szynach kolejowych i w zgrzewanych połączeniach tych szyn. Badali przebieg naprężeń w złączach szynowych po zgrzewaniu oraz po badaniach zmęgniowych tych połączeń. W badaniach zastosowali tensometryczną metodę niszczącą według normy PN EN 13674-1:2011+A1:2017. Do badań użyto szyny wykonane ze stali R260 oraz R350HT.



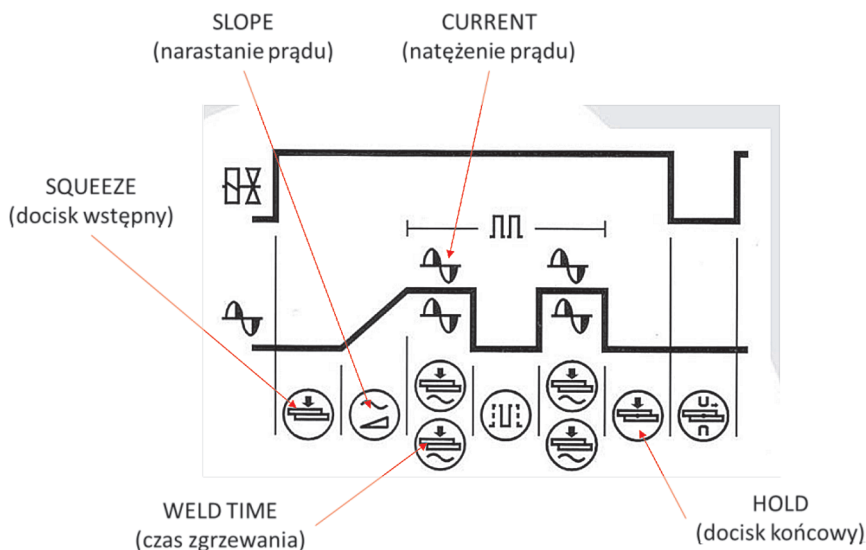
Rys. 2. Schemat przygotowania próbek do oceny ich wytrzymałości [6]

kowych połączeń wymaga jednak precyzyjnego 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 grubościach 0,8 i 1,8 mm. Testy zgrzewania przeprowadzono na przeznaczonej do tego celu maszynie, natomiast badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę ścinania. W końcowej części artykułu dokonano analizy porównawczej nośności połączenia i budowy spoiny uzyskanej tą metodą ze zgrzeiną wykonaną metodą zgrzewania oporowego.

W artykule [5] zaprezentowano prototypowe stanowisko badawcze oraz technologię łączenia kompozytu Litecor® ze stalą DP600. Zasada łączenia dwóch, różnych materiałów realizowana była w dwóch etapach. Pierwszy etap polegał na usunięciu nieprzewodzącej warstwy polimeru ze strefy zgrzewania i stworzeniu odpowiedniego styku elektrycznego do zgrzewania oporowego. Drugi zaś był klasycznym punktowym zgrzewaniem rezystancyjnym. Wykonane złącza były poddane badaniom makrograficznym, wytrzymałościowym, ultradźwiękowym oraz topograficznym.

W publikacji [6] Autorzy zaprezentowali wyniki badań własnych, w których dokonali zgrzewania materiałów powszechnie uznawanych za tzw. złom użytkowy, czyli materiałów pokrytych korozją powierzchniową, które w praktyce są używane do produkcji niektórych produktów. Badania były wynikiem współpracy z przemysłem w aspekcie oszczędności materiału i możliwości jego dalszego

W publikacji [8] zaprezentowano modelowanie procesu zgrzewania punkтового. Wyniki uzyskane na podstawie opracowanego modelu porównano z wynikami badań eksperymentalnych. Przeprowadzone symulacje procesu zgrzewania były wynikiem potrzeb uzyskania odpowiednich parametrów wytrzymałościowych złączy poprzez dobór właściwych parametrów technologicznych.



Rys. 3. Cykl zgrzewania na zgrzewarce oporowej TECNA [2]

Autorzy w publikacji [9] opisali teorię zgrzewania punktowego oraz budowę typowych zgrzewarek, a także przeprowadzili dyskusję na temat wpływu ich konstrukcji na jakość zgrzein. Głównym tematem opracowania jest proces projektowania oraz budowy zgrzewarki punktowej służącej do zgrzewania ogniw akumulatorowych. Wykorzystując opracowane urządzenie, Autorzy przeprowadzili testy i opisali ich wyniki zrealizowane przy różnych obciążeniach uzwojenia wtórnego oraz zgrzewania punktowego, obejmującego zgrzewanie taśm stalowych używanych do łączenia ogniw.

W artykule [10] Autorzy opisali połączenia zgrzewane punktowo stosowane w budowie karoserii nowoczesnych pojazdów samochodowych. Zaprezentowali wyniki badań, do których wykorzystali metodę ultradźwiękową, wykonanych połączeń przy różnych wartościach prądu zgrzewania. Wykorzystano głowice ultradźwiękowe o częstotliwości 20 MHz z wodną linią opóźniającą. Wykonane połączenia poddano weryfikacji badaniami niszczącymi, jakimi była próba ścinania na maszynie wytrzymałościowej oraz pomiar średnicy jądra zgrzeiny.

W publikacji [11] Autor dokonał przeglądu podstawowych gatunków stopów tytanu pod kątem specyfiki ich łączenia. Opisał te metody, poczynając od najbardziej rozpowszechnionych, takich jak: GTA, GMA, wiązką elektronów, do rzad-

ko stosowanych, takich jak: lutozgrzewanie, łączenie wybuchowe i dyfuzyjne. W podsumowaniu zawarł wskazówki oraz zalecenia dotyczące specyfiki łączenia stopów Ti wybranymi metodami.

Z przedstawionego skrótego przeglądu literatury wynika, że Autorzy publikacji prezentują wyniki badań zarówno pod kątem łączonych materiałów, ale również własne konstrukcje zgrzewarek przeznaczonych do łączenia różnych materiałów lub elementów o specjalnych kształtach lub przeznaczeniu. Nie analizują natomiast efektów łączenia w aspekcie estetycznym

Badania własne

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu parametru zgrzewania punktowego na jakości zgrzein. Do tego celu przygotowano płaskowniki z blachy stalowej pokazane na rysunku 1 w gatunku S235, o wymiarach $2 \times 25 \times 160$ mm.

Próbki, pokazane na rysunku 2 zostały wykonane jako połączenie zakładkowe z zakładką o długości 25 mm, na końcach których przymocowane były dokładki 2 pozwalające na prawidłowe (osiowe) uchwycenie próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej.

Ponieważ, w procesie produkcyjnym jakość zgrzein uzyskiwana jest zazwyczaj tylko zmianą natężenia prądu zgrzewania, w niniejszych badaniach również przyjęto taką metodykę.

W badaniach użyta została zgrzewarka oporowa firmy TECNA typu TE90 Mark II, w której istnieje możliwość zmiany parametrów zgrzewania w obszarze jednego cyklu roboczego. Jego schemat pokazano na rysunku 3, a wynika z niego, że w cyklu zgrzewania regulowane mogą być następujące parametry:

- docisk wstępny (SQUEEZE), parametr regulowany przez użytkownika;
- narastanie prądu (SLOP), parametr regulowany przez sterownik urządzenia, bez możliwości regulacji przez użytkownika;
- natężenie prądu (CURRENT), parametr regulowany przez użytkownika;
- czas zgrzewania (WELD TIME), parametr regulowany przez użytkownika;
- docisk końcowy (HOLD), parametr regulowany przez użytkownika.

Próbki oznaczone jako A, B, C, D oraz E poddano zgrzewaniu z parametrami o wartościach zawartych w Tabeli 1. Zgodnie z przyjętą metodyką, zmianie ulegał tylko parametr prądu (CURRENT).

Na rysunku 4 pokazano uzyskane zgrzeiny, których wstępna ocena wizualna wykazała, że na ich geometrię ma wpływ zmiana wartości przejętego parametru.

Tak przygotowane próbki zostały poddane dalszym badaniom mającym na celu pozyskanie bardziej szczegółowej wiedzy dotyczącej jakości wykonanych zgrzein oraz ich wytrzymałości. W tym celu wykonano:

- pomiary geometrii,
- pomiary głębokości,
- prześwietlenia RTG,
- zrywanie na maszynie wytrzymałościowej w celu określenia ich wytrzymałości.

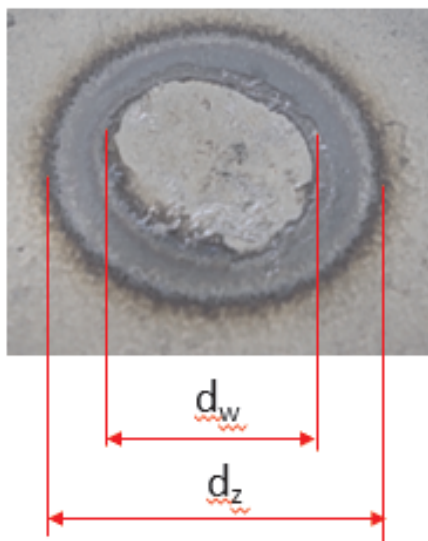
Ocena wizualna i pomiary geometrii zgrzein

Wraz ze wzrostem natężenia prądu, zaobserwowano wzrost wymiarów strefy przepalenia. Za pomocą suwmiarki dokonano pomiarów średnicy przypalenia d_z oraz średnicy zgrzeiny d_w w najszerszym jej miejscu – rysunek 5.

Podczas oceny wizualnej zaobserwowano również zmienną głębokość zgrzeiny h . Pomiarów tego parametru doko-



Rys. 4. Poszczególne próbki uzyskane w procesie zgrzewania z wybranymi parametrami



Rys. 5. Sposób pomiaru wymiarów zgrzeiny: d_z – średnica strefy przypalenia, d_w – średnica zgrzeiny

nano za pomocą głębokościomierza względem powierzchni płaskownika będącego próbką, a zaobserwowanym największym zagłębieniem zgrzeiny. Dane z pomiarów zebrane zostały w Tabeli 2. Wynika z nich, że wraz ze wzrostem parametru CURRENT, wzrastają: średnica przypalenia d_z , średnicy zgrzeiny d_w oraz głębokość zgrzeiny h .

Topografia zgrzein w aspekcie ich głębokości

W celu określenia dokładniejszej topografii zgrzein, wykonano skanowanie przygotowanych próbek za pomocą mikroskopu różnicowego ogniskowego Alicona InfiniteFocus z obiektywem o 5-krotnym powiększeniu posiadającym rozdzielczość pionową o wartości $0,25\mu m$ oraz poziomą – $0,40\mu m$.

Pokazane na rysunku 6 skany poszczególnych zgrzein posłużyły do sporządzenia wykresów wybranych próbek, pokazanych na rysunkach 7 i 8 obrazujących dokładne wartości ich zagłębienia w odniesieniu do płaszczyzny materiału płaskownika.

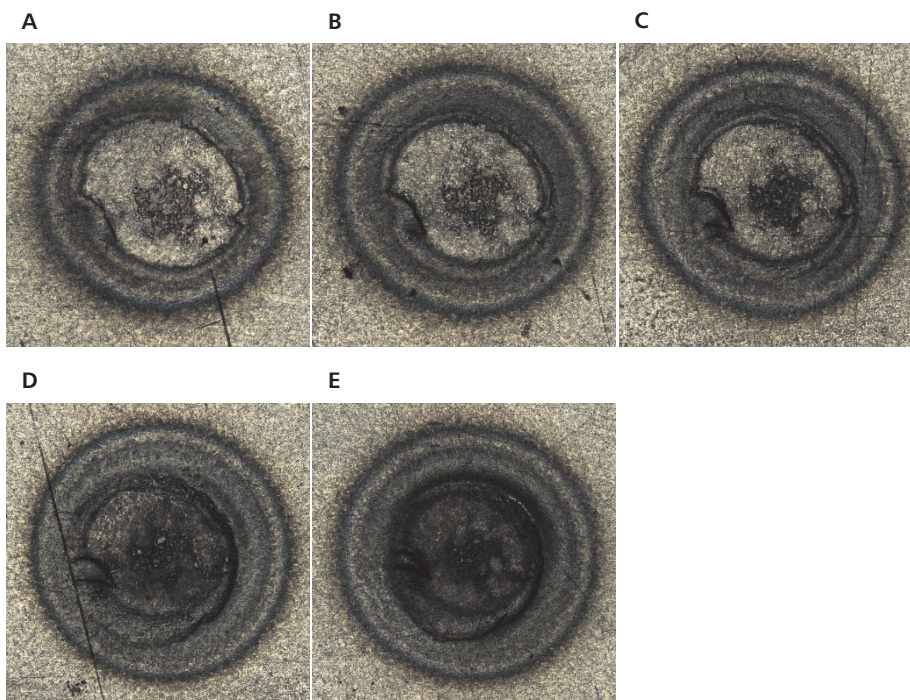
Zaprezentowane na rysunkach 7 i 8 szczegółowe topografie wskazują, że nacisk elektrody wraz z upływem czasu docisku w obrębie jednego cyklu powoduje nie tylko zagłębienie jeziorka (kolor różowy), ale również powstawanie wypłytki (kolor czerwony w żółtym polu), co jest spowodowane niedokładnością kształtu końcówki elektrody, która do

Tabela 1. Wartości parametrów zgrzewania poszczególnych próbek

Parametr	Oznaczenie próbki				
	A	B	C	D	E
SQUEEZE	20	20	20	20	20
SLOPE	—	—	—	—	—
WELD TIME	24	24	24	24	24
CURRENT	40	45	50	55	60
HOLD	16	16	16	16	16
Teoretyczny czas cyklu	1,36	1,44	1,52	1,6	1,68

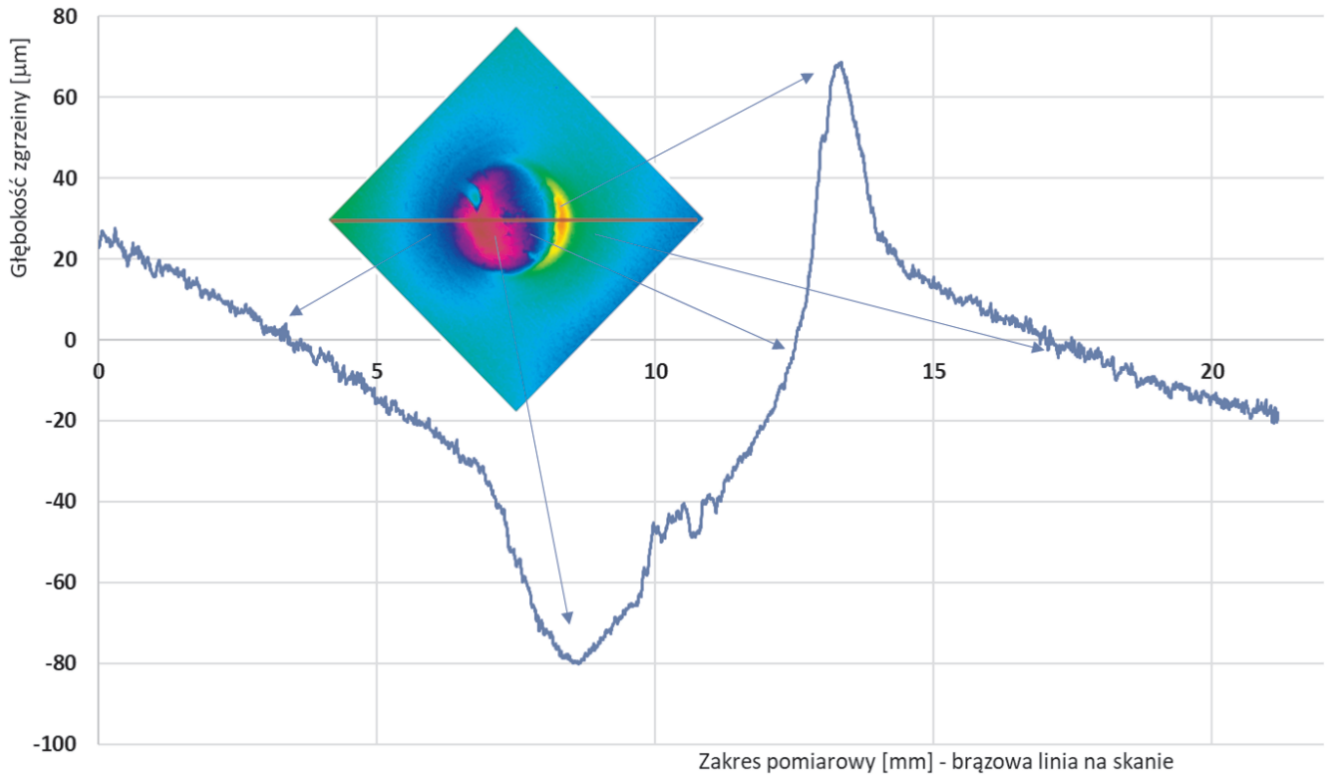
Tabela 2. Wyniki pomiarów geometrycznych cech zgrzeiny

PRÓBKĄ		A	B	C	D	E
STREFA PRZEPALENIA	d_z [mm]	8,07	8,65	9,45	10,6	11,3
JEZIORKO	d_w [mm]	5,22	5,3	5,38	6,15	7,01
GŁĘBOKOŚĆ	h [mm]	0,01	0,03	0,05	0,12	0,23



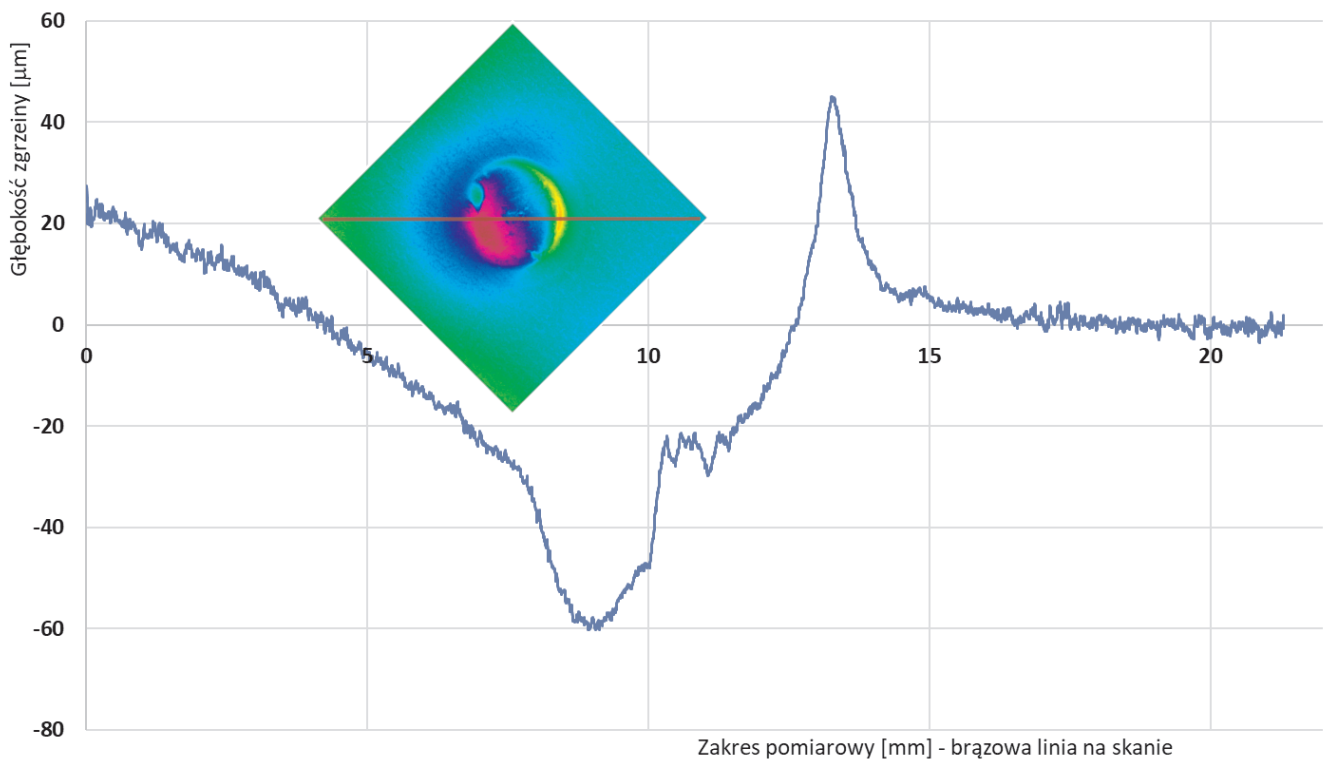
Rys. 6. Skany poszczególnych zgrzein

Pomiar skanu próbki A



Rys. 7. Topografia zagłębienia zgrzein A

Pomiar skanu próbki B



Rys. 8. Topografia zagłębienia zgrzein B

badania nie była w żaden sposób korygowana.

Prześwietlenie RTG zgrzein

Kolejnym etapem badań, było wykonanie prześwietleń RTG (pokazanych na rysunku 9), które wykonano na mikrotomografie komputerowym GE vtomxs z następującymi parametrami:

- czas prześwietlania 500 ms,
- napięcie 130 kV,
- natężenie 100 μ A.

Cechą charakterystyczną prześwietlanych próbek jest jasny punkt nazywany w literaturze „kometką”. Jest on widoczny na rysunkach 9A-9C, natomiast na rysunkach 9D oraz 9E – nie jest wi-

doczny. W literaturze dotyczącej zgrzewania punktowego nie znaleziono jasnych przesłanek wskazujących na powstawanie kometki w odniesieniu do parametrów zgrzewania lub gatunku zgrzewanego materiału.

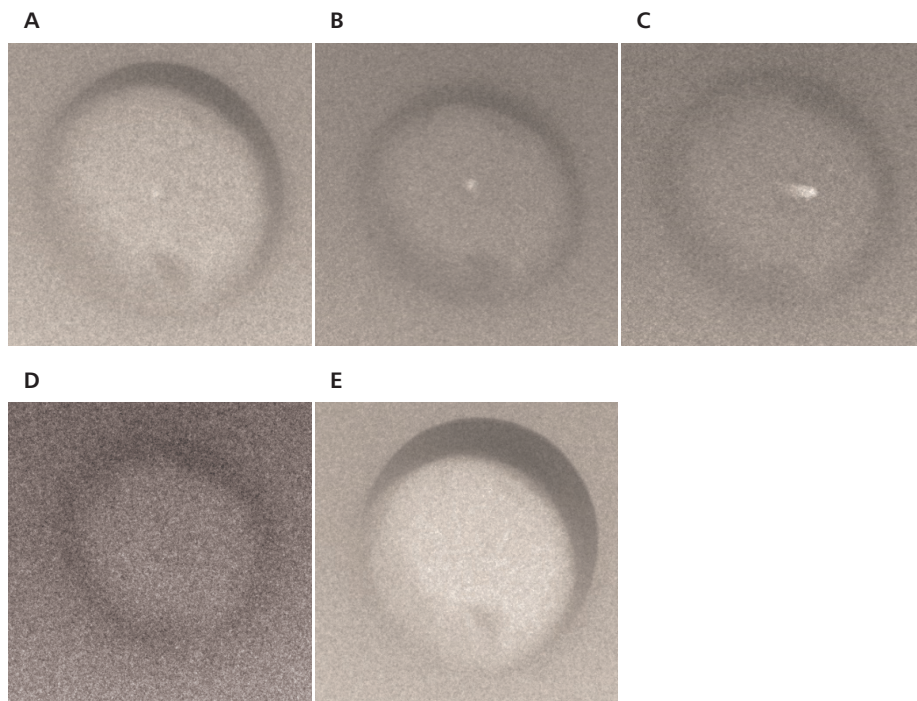
Wytrzymałość próbek

Ostatnim badaniem przygotowanych próbek było sprawdzenie ich wytrzymałości, które zostało przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej typu Hungta HT-2402s. Próby wykonano z prędkością 10 mm/min. Na rysunku 10 zaprezentowane wykresy zrywania natomiast na rysunku 11 pokazane zostały wybrane próbki po zakończonym procesie zrywania.

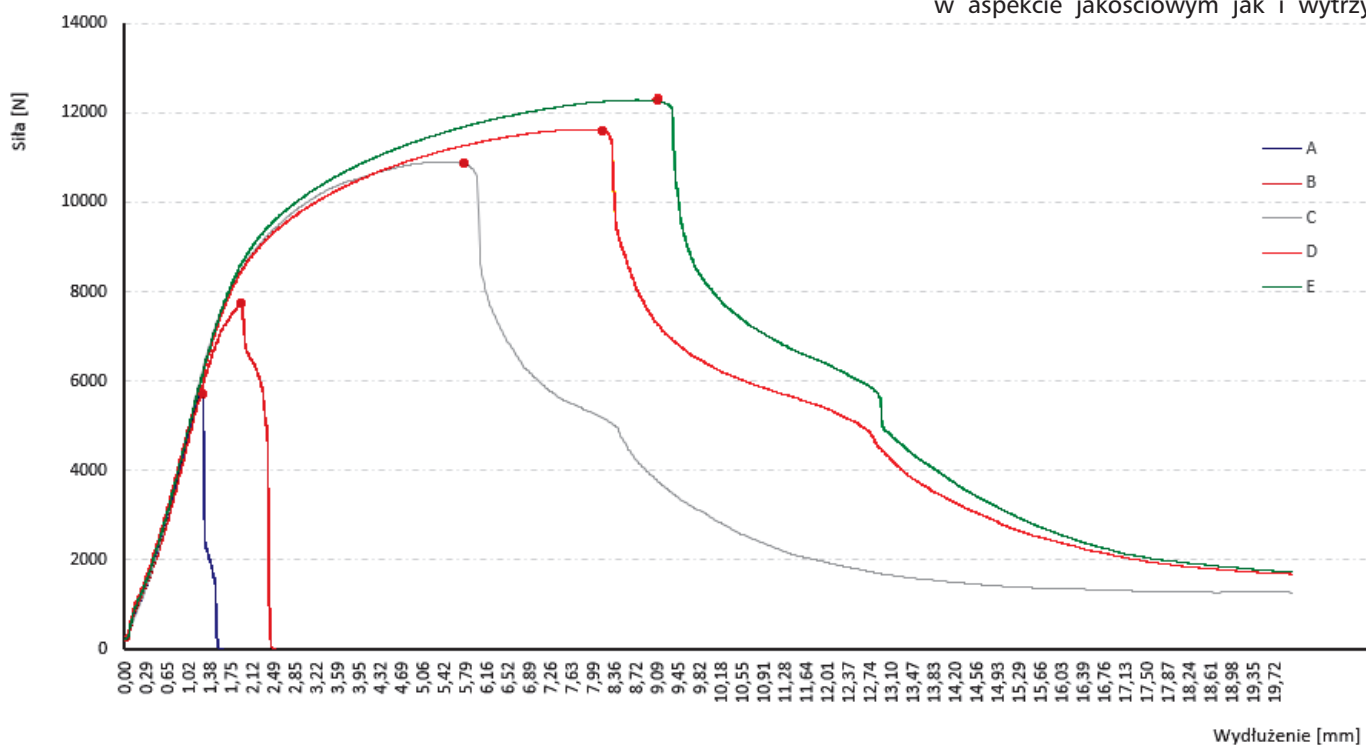
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem parametru *CURRENT* zwiększa się średnia wartość siły zrywającej – wartości szczytowe zaznaczone zostały na rysunku 10 jako czerwone punkty. Na rysunku 12 pokazana została zależność uzyskanej siły zrywania w stosunku do zmierzonej średnicy zgrzeiny, co również potwierdza powyższe spostrzeżenie.

PODSUMOWANIE

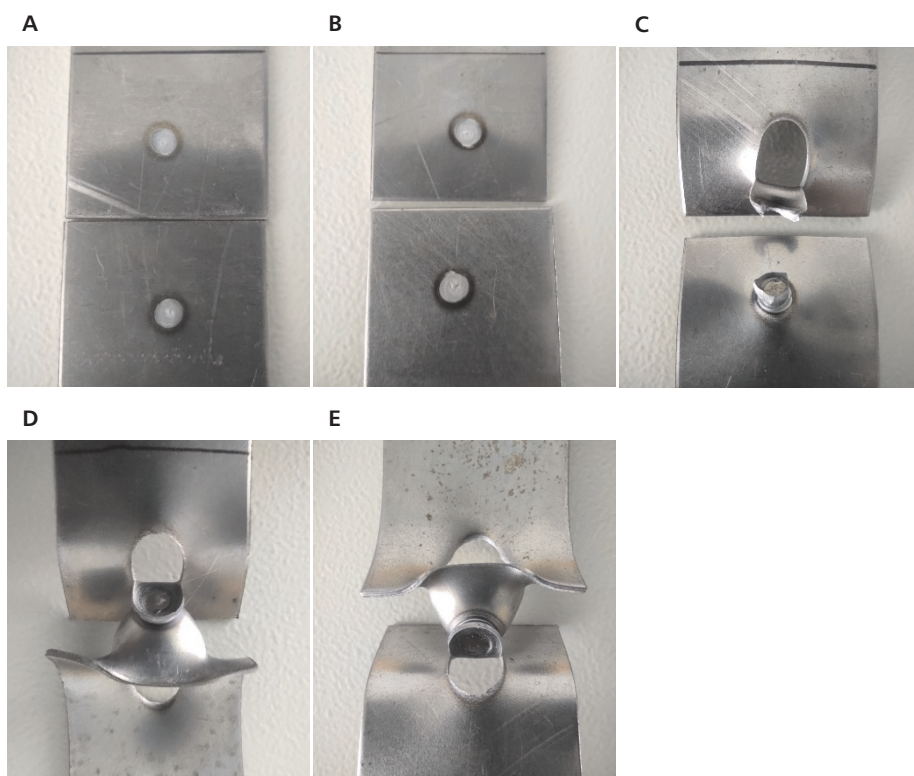
Zmiana tylko jednego parametru zgrzewania może, ale nie musi prowadzić do uzyskania złej jakości spoiny, zarówno w aspekcie jakościowym jak i wytrzy-



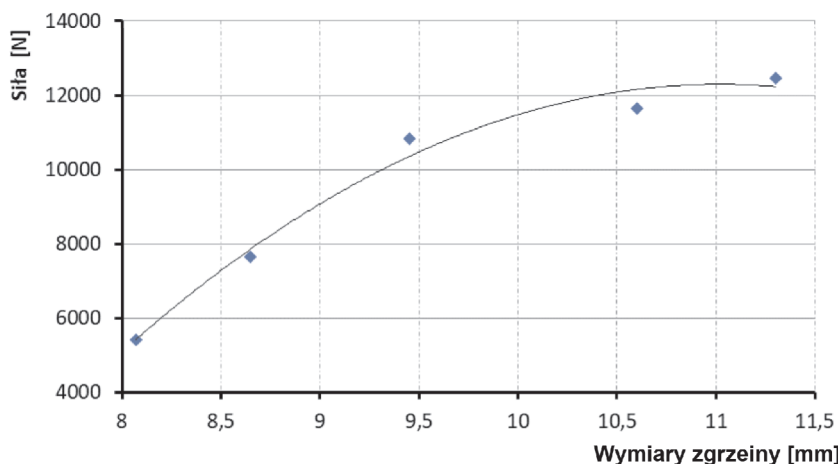
Rys. 9. Zdjęcia RTG poszczególnych zgrzein



Rys. 10. Zależność średniej wartości siły zrywania w funkcji wydłużenia



Rys. 11. Przykłady zerwanych próbek



Rys. 12. Zależność średniej wartości siły zrywania od średnicy zgrzeiny

małościowym. Złożoność tego procesu jest na tyle duża, że na jakość zgrzein ma wpływ wiele parametrów.

Mimo to, wykonane badania wykazały, że zmiana nawet jednego parametru może doprowadzić do pogorszenia walorów estetycznych zgrzein, a dalsze procesy maskowania tych miejsc mogą okazać się kłopotliwe oraz kosztowne.

W literaturze brakuje informacji dotyczących jakości wizualnej zgrzein, która w niektórych przypadkach stanowi ważny aspekt jakościowy wyrobu.

Zaprezentowany na rysunku 7 wykres topografii próbki A pokazuje, że powierzchnia zgrzeiny nie jest płaska w całym jej zakresie pomiarowym. Miejsce centralne zgrzeiny (kolor różowy) obrazuje miejsce zagłębienia powstałego wskutek docisku szczęk. Z prawej strony kolorem czerwonym, zaznaczona została wypływka będąca wynikiem przemieszczenia uplastycznionego materiału podczas docisku powodując, że wyrób gotowy prawdopodobnie będzie wymagać dodatkowych zabiegów poprawiających walor wizualny zgrzeiny.

Wykonane prześwietlenia RTG zgrzein, uwiaryściły białe obszary w środkowej części, nazywane w niektórych opracowaniach „kometkami”. Z uwagi na brak wzmianek w literaturze na ten temat, należałoby przeprowadzić dodatkowe badania dotyczące genezy ich powstawania oraz ich wpływu na cechy połączenia.

Literatura

1. Borys S.: Badanie drgań narzędzia w zrobotyzowanym procesie zgrzewania. *Mechanik* vol. 89, nr 7/2016, s. 646-647.
2. Instrukcja użytkownika zgrzewarki oporowej firmy TECNA.
3. Kašěák L., Cmorej D., Spišák E., Slota J.: Joining the High-Strength Steel Sheets Used in Car Body Production. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, Vol. 15, No. (1)/2001, s. 184-196.
4. Kluz, R., Kubit, A., Wydrzyński, D.: Zgrzewanie punktowe blach ze stopu aluminium 7075-T6. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, nr 2/2017, s.56-60.
5. Kustroń P., Korzeniowski M., Piwowarczyk T., Sokołowski P.: Zgrzewanie hybrydowe kompozytów MPC z polimerową warstwą nieprzewodzącą. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, Vol. 65, nr 4/2021, s. 33-40.
6. Lonkwic P., Usydus I.: Zgrzewanie oporowe w praktyce inżynierskiej. *Obróbka Metalu* nr 2/2022, s. 47-53.
7. Miłkaszewicz I., Siwiec J.: Badanie naprężeń wewnętrznych w złączach zgrzewanych szyn kolejowych. *Problemy Kolejnictwa*, z. 185/2019, s. 31-37.
8. Motyka M., Wróbel I.: Analiza MES procesu zgrzewania elektrycznego oporowego. doi: <https://doi.org/10.53052/9788366249837.17>, s. 193-209.
9. Smolarski A., Wesołowski M.: Konstrukcja i badania transformatorowej oporowej zgrzewarki punktowej. *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, Vol. 62, nr 12/2021, s. 26-34.
10. Strumiński Z., Ulbrich D., Kowalczyk J., Stępak D.: Ultradźwiękowa ocena połączeń zgrzewanych punktowo. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka* nr 4/2018, s. 20-23.
11. Szulc T.: Welding methods of joining titanium alloys. *Stal, Metale & Nowe Technologie*, nr 11-12/2021, s. 39-42. ■