

Wprowadzenie głęboko wtapiających metod spawania drogą do oszczędności materiałowych i zwiększania nośności konstrukcji spawanych

Wprowadzenie

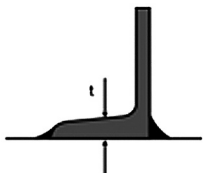
Konstrukcje spawane składane są z elementów łączonych zasadniczo dwoma rodzajami spoin: czołowymi i pachwinowymi. Spoiny te różnią się kilkoma cechami, z których najistotniejsze wymieniono w tablicy 1 [1].

Najistotniejszą z nich decydującą o rozpowszechnieniu spoin pachwinowych, jest łatwość ich wykonywania – niewymagająca zatrudniania wysokokwalifikowanych spawaczy i ukosowania łączonych elementów. Konieczność fazowania blach, rur lub innych części konstrukcji

może znacząco podnieść koszt wykonania konstrukcji poprzez wydłużenie czasu realizacji zamówienia, wymaganie użycia dodatkowych urządzeń do ukosowania, wzrost masy odpadów przy obróbce materiałów podstawowych itp. zniechęca projektantów do stosowania spoin czołowych w konstrukcjach.

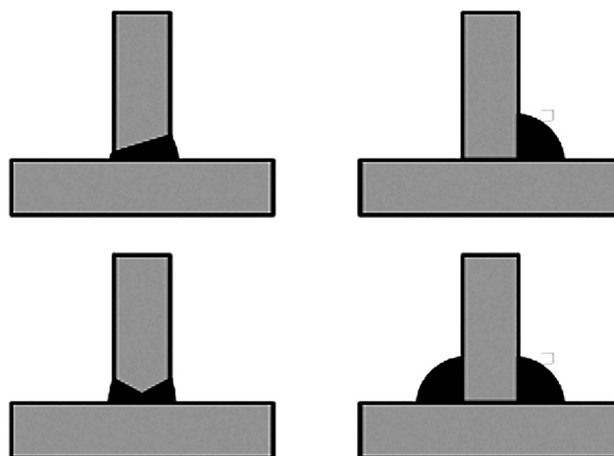
Spoiny pachwinowe jednak z punktu widzenia jakości ostatecznie wykonanej i obciążonej konstrukcji są mniej korzystne od czołowych. Nie osiągają grubości, a więc wytrzymałości elementów łączonych, a ponadto wprowadzają – możliwe do uniknięcia w spoinach czołowych – karby śpiętrzające naprężenia w grani spoin. Nowoczesne konstrukcje spawane są projektowane metodą stanów granicznych nośności [2], co oznacza wyłączenie kluczowych węzłów i elementów konstrukcyjnych na poziomie zbliżonym do ich granicy plastyczności. Śpiętrzenie naprężeń może spowodować jej przekroczenie, zmianę układu statycznego sił, a następnie inicjację i rozwój pęknięć postępujących od strony grani w kierunku lica spoin [3]. Brak przetopu w grani spoiny może stać się niewrażliwym punktem całej konstrukcji, szczególnie gdy jest ona narażona na działanie zmiennych naprężeń pochodzących od obciążeń zewnętrznych. Konstrukcje tego typu stanowią lwią część obecnie wykonywanych. Są to konstrukcje mostowe, dźwigowe, maszyny górnicze, konstrukcje budownictwa lądowego i wodnego – zarówno pływające jak i przybrzeżne a także energetyczne pracujące w podwyższonych i wysokich temperaturach w obecności wysokich ciśnień. Istotne jest, z punktu

Tablica 1. Cechy spoin pachwinowych i czołowych [1]

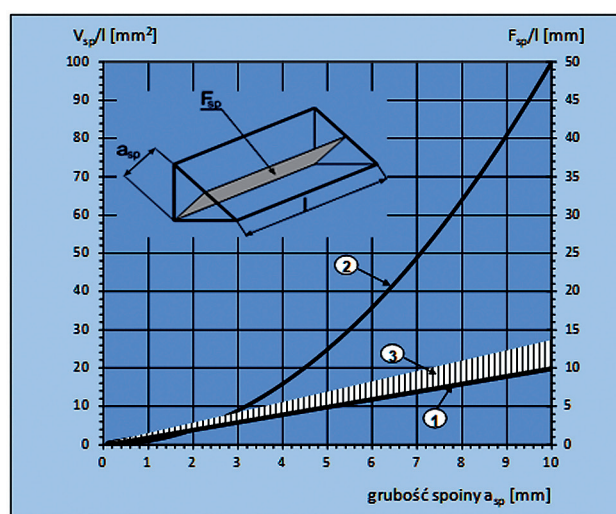
Spoiny czołowe	Spoiny pachwinowe
Praktycznie <u>zawsze</u> mają grubość materiałów łączonych, ewentualnie cieńszego z nich (wyjątkiem są spoiny czołowe z niepełnym przetopem dopuszczone Eurokodem 3).	Prawidłowo zaprojektowane i wykonane nigdy nie osiągają grubości łączonych materiałów, mieszcząc się w granicach (powyżej 3 mm): $t_{sp} > 0,2 t_{max}$ $t_{sp} \leq 0,7 t_{min}$ dla spoin jednostronnych, $t_{sp} \leq 0,5 t_{min}$ dla spoin dwustronnych. W przypadku spawania kształtowników walcowanych na gorąco, wielkości te wynoszą odpowiednio 0,6 t i 0,8 t: 
Powyżej pewnej, charakterystycznej dla konkretnej metody spawania grubości, złącza muszą być zestawione z materiałów ukosowanych.	Nie wymagają ukosowania materiałów spawanych.
Powinny posiadać płaskie lub nieznacznie wypukłe lico.	Wypukłe lico jest zawsze niekorzystne, zarówno ze względów wytrzymałościowych, jak i ekonomicznych. Najkorzystniejsze jest lico wklęsłe, a akceptowane – płaskie.
Nie powiększają objętości konstrukcji.	Zwiększają objętość konstrukcji.
Przeznaczone są do przenoszenia obciążeń głównych.	Przeznaczone raczej do łączenia elementów słabiej obciążonych i nie poddanych obciążeniom wibracyjnym.
Ich przekrój poprzeczny jest zdefiniowany grubościami elementów, a jego zmniejszenie jest możliwe poprzez stosowanie metod z wykorzystaniem łuku o dużej gęstości mocy.	Mogą być powiększone „do wewnątrz” pod warunkiem dokumentowania tego faktu. Wykorzystując głęboko wtapiające metody spawania można powiększyć grubość spoin pachwinowych [1].
Łatwość kontroli nieniszczącej oraz możliwość uzyskiwania grani spoin o wysokich parametrach wytrzymałościowych (wyjątkiem są spoiny czołowe z niepełnym przetopem).	Zarówno w przypadku spoin jedno- jak i dwustronnych istnieje ograniczona możliwość kontroli istnienia i jakości przetopu, co może prowadzić do obecności w grani karbów i inicjatorów pęknięć.
Długość spoiny jest zawsze równa długości materiałów łączonych.	Obliczeniowa długość spoiny nie jest sztywno związana z długością elementów. Istnieją ściegi przerywane. Długość pojedynczych odcinków spoin pachwinowych zawarta jest między $6 a_{sp}$ a $150 a_{sp}$ (a_{sp} – obliczeniowa grubość spoiny) jednak nie mniej niż 30 mm. Powyżej $150 a_{sp}$ lub 1,7 m spoiny mają mniejszą wytrzymałość obliczeniową.

Dr hab. inż. Krzysztof Kudła prof. PCz., dr inż. Kwiryn Wojsyk, dr inż. Krzysztof Makles – Politechnika Częstochowska; mgr inż. Michał Macherzyński – Zugil S.A.

widzenia użytkowników, by były one niezawodne, trwałe i bezpieczne. Właściwości te trudniej osiągnąć, mając do dyspozycji jedynie spoiny pachwinowe. Należy zaznaczyć, że inżynier projektujący konstrukcję i zakładający obecność spoin pachwinowych musi liczyć się z trudnościami kontroli ich jakości i możliwością niewykrycia istotnych niezgodności spawalniczych w kardynalny sposób rzutu- jących na dalszą bezpieczną eksploatację całej konstruk- cji. Stąd też, w dobie możliwości głębszego wtapiania się w materiały łączone powinno się je wykorzystywać w nowoczesnych metodach łukowych lub hybrydowych spawania do przekształcania spoin pachwinowych w czo- łowe lub czołowo-pachwinowe, zarówno podczas projek- towania, jak i wykonywania konstrukcji. Procesowi temu sprzyja mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja zarów- no przygotowawczych jak i całościowych prac spawalni- czych. Dzięki temu bez znaczących dodatkowych kosztów i komplikacji operacji wytwórczych przekształcić można spoin pachwinowe w czołowe lub czołowo-pachwinowe. Można w znacznym stopniu zrezygnować z ukosowania wstępnego i wykwalifikowanych spawaczy. Oszczędności natomiast wynikające z obniżonego zużycia materiałów dodatkowych do spawania, podwyższenia jakości spoin, ułatwienia i przyspieszenia procesów kontrolnych, a nawet ich automatyzacji, staną się dominujące. Jakość uzyskiwa- nych spoin zależy głównie od nastawienia i utrzymywania założonych parametrów spawania. Po sprzężeniu robotów z urządzeniami peryferyjnymi, pozycjonerami, manipu- latorami spawalniczymi i zasilaczami łuku spawanie moż- na przeprowadzać w pozycji podolnej (PA) lub nabocznej (PB), unikając innych pozycji przymusowych, co z kolei umożliwia zastosowanie wyższych parametrów prądowo- napięciowych prowadzących do głębokiego wtapiania spoin i wyższej wydajności procesowej. W ten sposób bez ukosowania można uzyskać możliwość łączenia grubych elementów nie tylko doczołowo, ale ustawionych kąto- wo, teowo lub krzyżowo. Niewielki nadlew lub kontrolowa- ny wyciek materiału dodatkowego od strony grani spoiny stanowi minimalny ułamek objętości materiałochłonnych spoin pachwinowych, a spoiny czołowe lub czołowo-pa- chwinowe otrzymywane w ten sposób są nie tylko wytrzy- malsze od spoin pachwinowych, ale również od materiałów podstawowych w strefie złącza. Takie wytwarzanie kon- strukcji jest również skuteczną metodą walki z przewymia- rowywaniem spoin w konstrukcjach, zwykle przyjmowa- nych w maksymalnej, dopuszczalnej grubości ($0,7 t_{\min}$ dla jednostronnych spoin pachwinowych lub $0,5 t_{\min}$ dla spoin dwustronnych). Możliwości te wynikają głównie z zastoso- wania różnego typu odmian procesu MAG oraz spawania hybrydowego (Laser-MAG, Plazma-MAG). Spoiny wy- konuje się zasadniczo tak samo, a zamiast spoin pachwi- nowych otrzymuje się czołowe lub czołowo-pachwinowe. Zostaje wypełniony odstęp między zestawionymi prostopad- le elementami, co likwiduje wewnętrzne, pochodzą- ce od karbu kształtu, spiętrzenie naprężeń. Innym mniej oczywistym, lecz niezwykle ważnym aspektem eliminacji spoin pachwinowych z konstrukcji spawanych jest struktu- ralne obniżenie wielkości odkształceń spawalniczych dzie- ki przesunięciu położenia środków ciężkości spoin bliżej osi obojętnych łączonych blach. Każde zbliżenie środka



Rys. 1. Równoważny przekrój spoin czołowych i pachwinowych w złączy teowym



Rys. 2. Zróżnicowanie wzrostu wytrzymałości (1) i objętości (2) symetrycznej spoiny pachwinowej o płaskim licu. (3) – obszar możliwego wzrostu wytrzymałości dzięki uwzględnieniu zwiększonego wtopienia dopuszczonego normą PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3

ciężkości spoiny do tych osi, zmniejszenie ich części wy- stających poza obrys blach sprzyja eliminacji odkształceń spawalniczych. Zadaniem konstruktorów i technologów spawalników jest zatem zamiana rodzaju, kształtu i usytu- owania spoin w złączach spawanych.

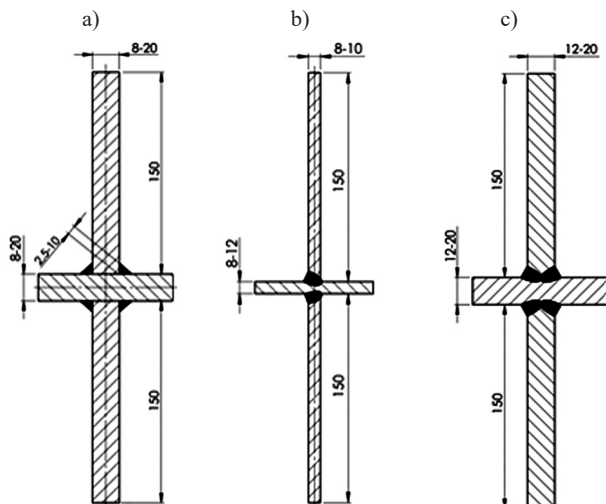
Zgodnie z założeniami przedstawionymi na rysunku 2, można zauważyć, że objętość spoiny pachwinowej rośnie znacznie szybciej niż jej wytrzymałość, natomiast nośność spoiny czołowej jest proporcjonalna do grubości łącznych elementów.

Badania eksperymentalne

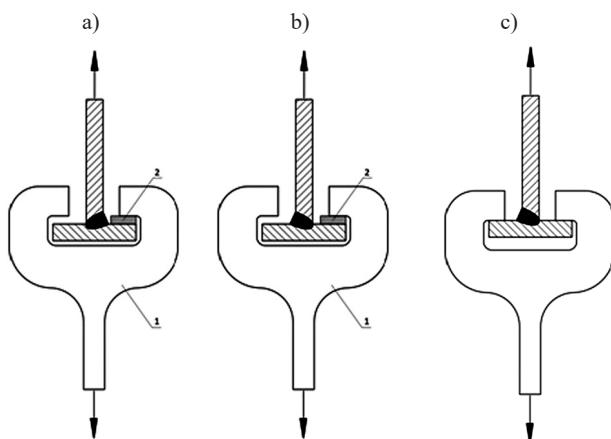
W Katedrze Technologii i Automatyzacji Politechniki Częstochowskiej w ramach projektu pt. „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania elementów i kon- strukcji wielkogabarytowych, w tym dźwigowych ogra- niczającej odkształcenia konstrukcji spawanych wraz z pilotażową linią technologiczną w firmie ZUGIL S.A.”, objętego wsparciem w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, realizowanego przez Zugil S.A. w Wieluniu, przeprowadzono badania dotyczące moż-

liwości zmniejszenia zużycia materiałów dodatkowych i odkształceń spawalniczych w złączach teowych i krzyżowych wykonywanych dotychczasowo w procesie standardowym MAG, przy założeniu dążenia do maksymalnej ich nośności (zerwanie w materiale rodzimym lub w zakresie wytrzymałości materiału rodzimego). Badania przeprowadzono dla pięciu gatunków stali: S355J2, S460NL, S700MC, S690QL i 450HBW (Hardox) wykorzystywanych w firmie Zugil S.A., wykonując i zrywając złącza teowe oraz krzyżowe (rys. 3) o grubościach odpowiednio 8+8 (8+8+8), 12+12 (12+12+12) oraz 20+20 (20+20+20). Materiałami dodatkowymi były druty elektrodowe w gatunkach G4Si1 i G69. Do przeprowadzenia procesu spawania głęboko wtapiającego wykorzystano zrobotyzowany system spawalniczy Qirox firmy Cloos [4], zasilacz łuku Quineco Puls 601 Pro oraz proces Rapid Weld.

Celem określenia mechanizmu i poziomu sił niszczących złącza teowe wykonane w procesie głęboko wtapiającym, przeprowadzono nienormowane autorskie próby rozrywania zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.



Rys. 3. Złącza krzyżowe ze spoinami a) pachwinowymi wykonanymi procesem standardowym, b) czołowymi jednostronnymi i c) dwustronnymi wykonanymi procesem głęboko wtapiającym



Rys. 4. Schemat prób zrywania złączy teowych wykonanych w procesie głęboko wtapiającym a) z jednoczesnym rozciąganiem lica spoiny; b) z jednoczesnym rozciąganiem grani spoiny; c) z symetrycznym rozciąganiem grani i lica spoiny

Rezultaty badań przedstawiono na rysunkach 5–9. Przedstawiono wartości średnie wskaźnika zużycia materiałów dodatkowych (wzór 1) przy założeniu pełnej nośności złączy wykonanych ze wskazanych wyżej materiałów podstawowych i dodatkowych. Zwraca uwagę zbieżność osiągniętych rezultatów z założeniem teoretycznym pokazanym na rysunku 2.

$$S_{MD} = \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot \frac{V_e}{V_s} \cdot k \quad [\text{mm}^2] \quad (1)$$

gdzie:

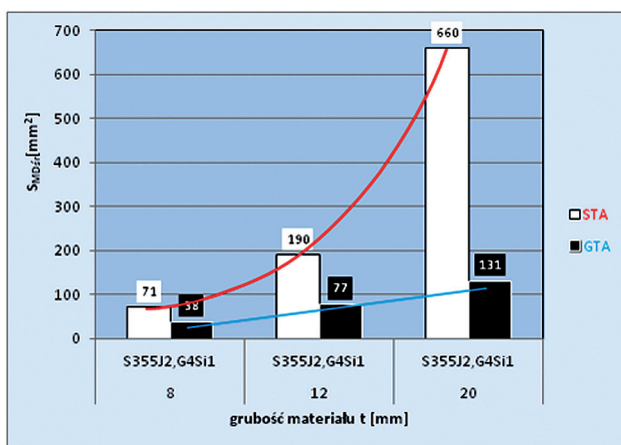
S_{MD} – średnia wartość wskaźnika zużycia materiału dodatkowego

d_e – średnica drutu elektrodowego [mm],

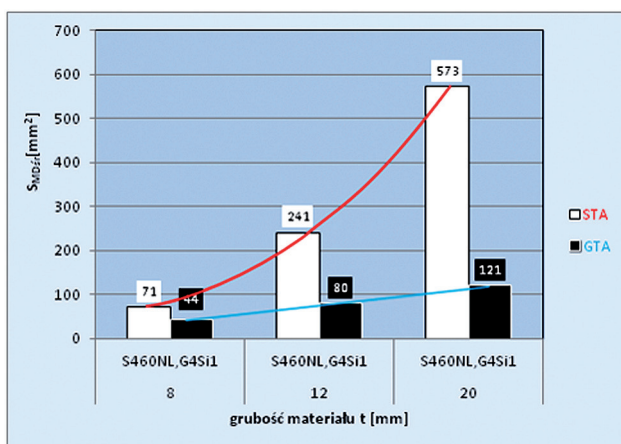
V_e – prędkość posuwu drutu elektrodowego [m/min],

V_s – szybkość spawania [m/min],

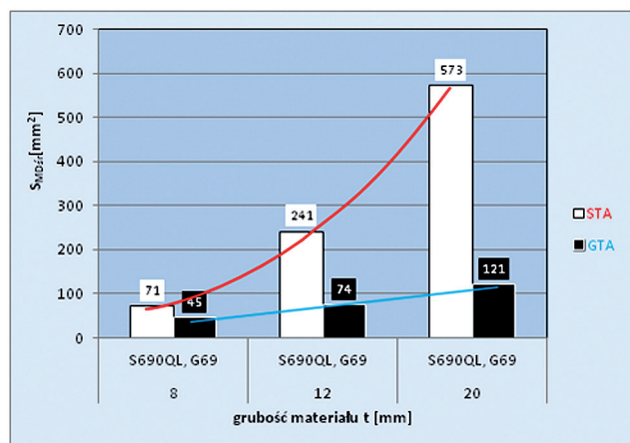
k – liczba spoin (o tych samych wymiarach) w złączu.



Rys. 5. Wartość średnia wskaźnika zużycia materiału dodatkowego (S_{MD}) w złączach spawanych w procesie standardowym (STA) i głęboko wtapiającym (GTA). Złącza o wytrzymałości materiału rodzimego (S355J2/G4Si1). Zakres oszczędności materiału dodatkowego od 46% (dla $t = 8$ mm) do 80% (dla $t = 20$ mm)



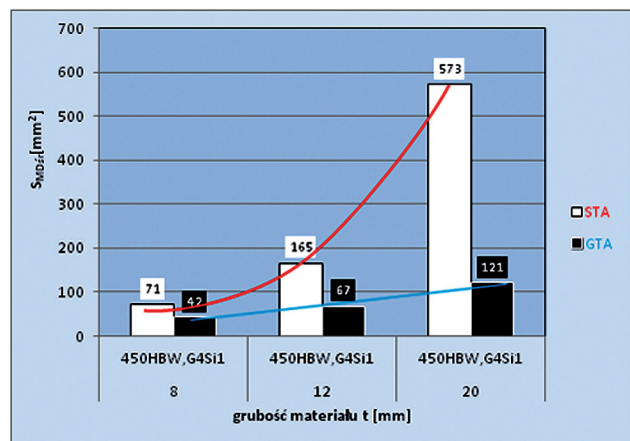
Rys. 6. Wartość średnia wskaźnika zużycia materiału dodatkowego (S_{MD}) w złączach spawanych w procesie standardowym (STA) i głęboko wtapiającym (GTA). Złącza o maksymalnej wytrzymałości (S460NL/G4Si1). Zakres oszczędności materiału dodatkowego od 38% (dla $t = 8$ mm) do 79% (dla $t = 20$ mm)



Rys. 7. Wartość średnia wskaźnika zużycia materiału dodatkowego (S_{MD}) w złączach spawanych w procesie standardowym (STA) i głęboko wtapiającym (GTA).

Złącza o maksymalnej wytrzymałości (S690QL/G69)

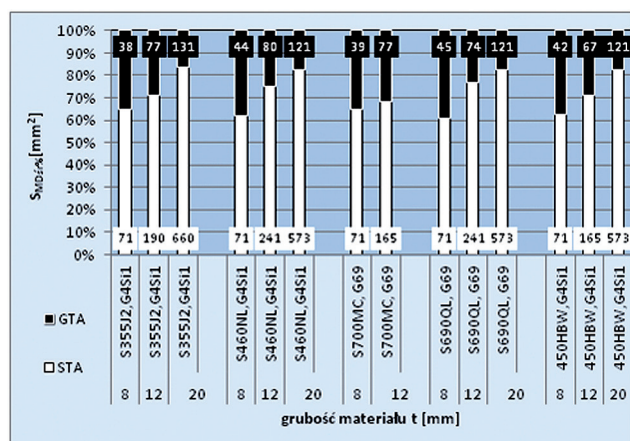
Zakres oszczędności materiału dodatkowego od 36% (dla $t = 8$ mm) do 79% (dla $t = 20$ mm).



Rys. 8. Wartość średnia wskaźnika zużycia materiału dodatkowego (S_{MD}) w złączach spawanych w procesie standardowym (STA) i głęboko wtapiającym (GTA).

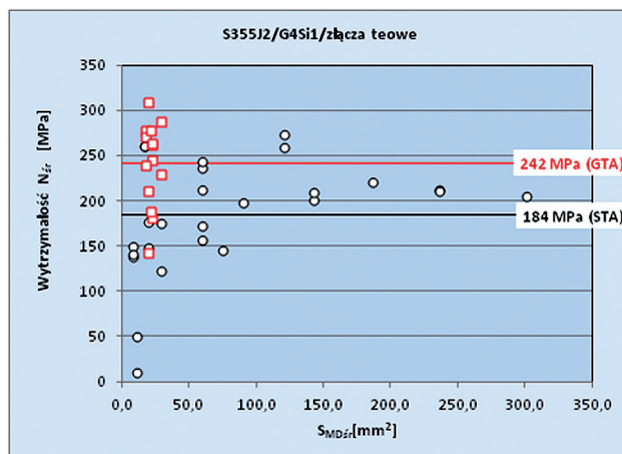
Złącza o maksymalnej wytrzymałości (450HBW/G4Si1).

Zakres oszczędności materiału dodatkowego od 40% (dla $t = 8$ mm) do 79% (dla $t = 20$ mm)

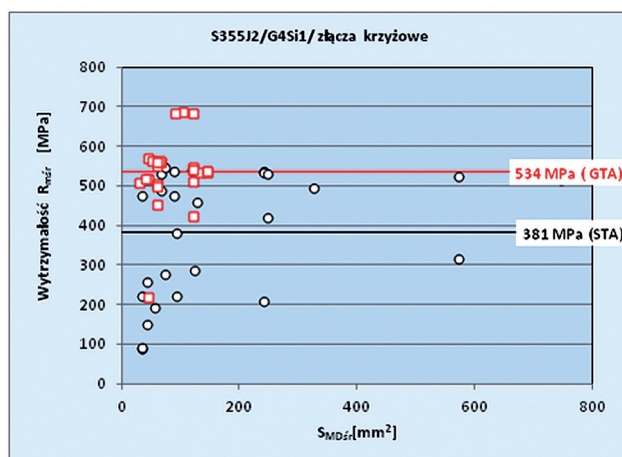


Rys. 9. Średni skumulowany procentowy wskaźnik zużycia materiału dodatkowego ($S_{MD\%}$) w złączach spawanych w procesie standardowym i głęboko wtapiającym

W sumie wykonano 360 złączy teowych i krzyżowych w zakresie grubości 8–20 mm. Oszczędności zużycia materiałów dodatkowych wahały się od 35% dla złączy o najmniejszej badanej grubości (8+8+8) do 80% dla złączy najgrubszych (20+20+20). Z drugiej strony oceniając nośność złączy teowych (rys. 10) i krzyżowych (rys. 11), zauważyć można znacznie wyższą wytrzymałość złączy ze spoinami głęboko wtopionymi (GTA) niż wykonywanych w procesie standardowym (STA).



Rys. 10. Średnia nośność złączy teowych w próbie z symetrycznym rozciąganiem lica i grani spoiny (S355J2/G4Si1)

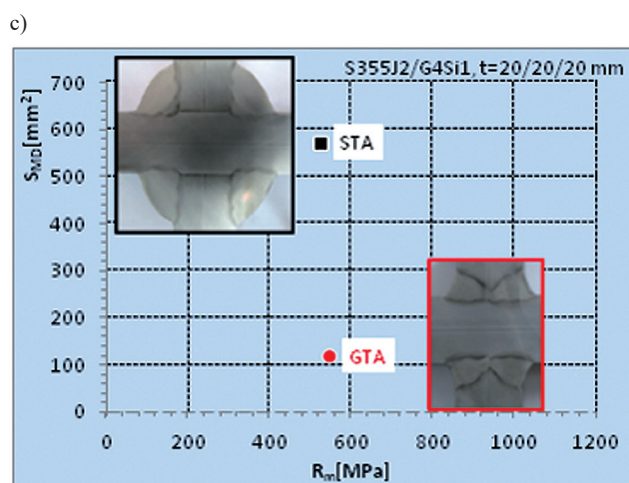
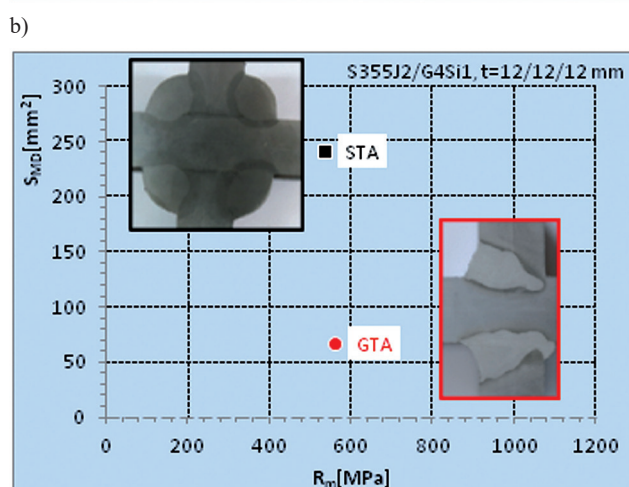
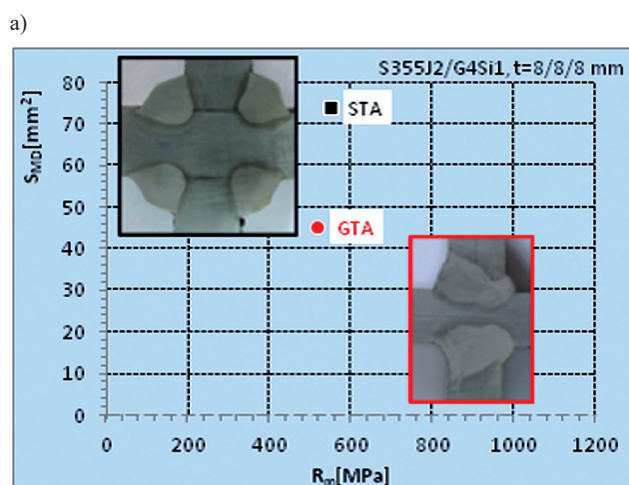


Rys. 11. Średnia wytrzymałość $R_{m\text{śr}}$ spawanych złączy krzyżowych w próbie rozrywania (S355J2/G4Si1)

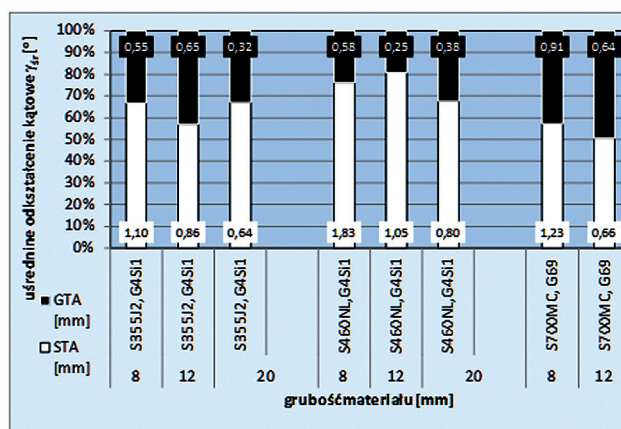
W ślad za zmniejszeniem zużycia materiałów dodatkowych, obniżeniem pól poprzecznych spoin i zbliżeniem ich środków ciężkości do osi obojętnych łączonych elementów spadały odkształcenia kątowe powstające w badanych złączach po spawaniu (rys. 13).

Można zauważyć, że odkształcenia kątowe w znacznej mierze decydują o pracochłonności konstrukcji, gdyż wymagają pospawalniczych zabiegów prostujących – zwykle złożonych i czasochłonnych.

Stosując metody głęboko wtapiające spawania, osiągnąć można zatem kilka istotnych celów konstrukcyjnych i ekonomicznych. Złącza są wytrzymałe, ich wykonanie odbywa się niewielkim nakładem energii, konstrukcje nie ulegają znacznym deformacjom wskutek spawania, a czas ich wykonania można znacząco ograniczyć. Korzyści te rosną wraz ze zmniejszeniem objętości spoin.



Rys. 12. Wskaźnik zużycia materiału dodatkowego (S_{MD}) w złączach krzyżowych dwustronnie spawanych w procesie standardowym STA i procesem głęboko wtapiającym GTA. Złącza o wytrzymałości materiału rodzimego (S355J2/G4Si1); a) $t = 8/8/8$ mm; b) $t = 12/12/12$ mm; c) $t = 20/20/20$ mm



Rys. 13. Średnie skumulowane procentowe odkształcenia kątowe γ_{sr} w złączach spawanych w procesie standardowym i głęboko wtapiającym

LITERATURA

1. Wojsyk K., Kudła K.: The rational use of fillet welds and butt-fillet welds in welded construction. *Welding Technology Review*, 2019, t. 91, nr 6, s. 7–14.
2. Eurokod 3 i PN-EN 1993-1-8:2006. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8. Projektowanie węzłów.
3. Wojsyk K., Nawrocki J.: Study of the impact of lack of fusion in the fillet weld on its fatigue strength under various load combinations. *Welding Technology Review*, 2019, t. 92, nr 1, s. 17–24.
4. Nieroba A., Kudła K., Siennicki M.: The Use of QIROX Robotic System for Special Welding Processes. *Welding Technology Review*, 2016, t. 88, nr 9, s. 141–145.