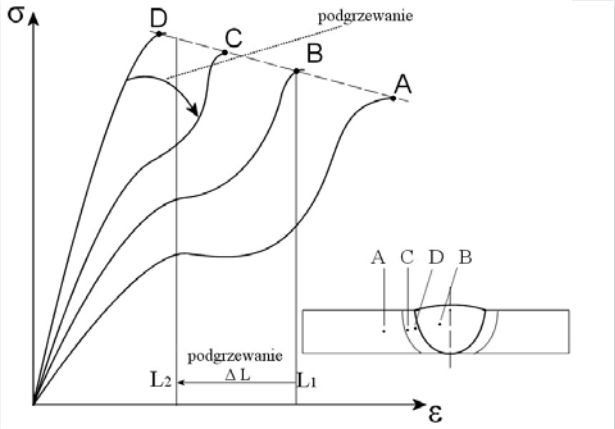
# Projektowanie spoin
## we współczesnych technikach spawania

**Dotychczasowe podejście do projektowania połączeń spawanych sprowadza się do policzenia naprężeń i pomnożenia ich przez współczynnik bezpieczeństwa na niewiedzę technologiczną projektanta. Ale czy do materiałów niejednorodnych można stosować abstrakcyjne pojęcie naprężeń spawalniczych?**

**Ryszard Jastrzębski**

Wyobraźmy sobie kratownicę pokrytą papierem pomalowanym na kolor stali. Projektant, na podstawie obciążenia i ugięcia, przy założeniu jednorodności materiału, policzy naprężenia w dowolnym punkcie belki. Po przebiciu papieru okaże się jednak, że w miejscu policzonych naprężeń jest powietrze, które nie przenosi sił wewnętrznych...

Przyjrzyjmy się zatem naszej spoinie w przekroju. Spoina jest zahartowana, a w jej otoczeniu, zwanym strefą wpływu ciepła, są wszystkie możliwe strefy wpływu ciepła. Wydawałoby się, że w tak mikroskopowych obszarach nie da się wyznaczyć krzywych rozciągania, a własności wytrzymałościowe materiału w skali mikro można tylko porównywać na podstawie mikro twardości Vickersa. Kilka lat temu pojawiły się w USA mikroskopowe maszyny wytrzymałościowe działające jak dziurkacz, który wycina mikro otwór w folii przekroju poprzecznego spoiny. W procesie skalowania urządzenia z wykresu zależności siły wycinania mikro otworu i przemieszczenia po przemnożeniu przez stałą wartość otrzymuje się wykres otrzymywany z rozciągania dużych próbek. Rysunek 1 pokazuje kilka takich krzywych rozciągania. Wraz ze wzrostem stopnia zahartowania krzywa jest bardziej stroma i przy mniejszym odkształceniu następuje pękanie. Gdyby spoina była zbiorem sprężyn to w wyniku rozciągania, po przekroczeniu dopuszczalnego odkształcenia najsztywniejszej sprężyny, sprężyna ta by pękła, ale pozostałe sprężyny przenosiłyby obciążenie. Ponieważ spoina jest kryształem, to pęknięcie mikroobszaru spowoduje pękanie całej spoiny. Oznacza to, ni mniej ni więcej, że w przypadku materiałów niejednorodnych posługiwanie się pojęciem naprężeń nie ma sensu. Zamiast kontrolować naprężenia należy więc badać odkształcenia i jedynym sensownym podejściem jest w tym wypadku ustalenie kryterium maksymalnego odkształcenia najbardziej kruchego mikro fragmentu spoiny. Jest to właściwie rewolucja w dziedzinie badań wytrzymałości materiałów. Chociaż, z doświadczenia jednak wiadomo, że przy dopuszczaniu suwnic i mostów drogowych do ruchu próba obciążenia polega na kontroli odkształceń.




Rys 1 Krzywe wytrzymałości różnych obszarów złącza spawanego. Wpływ podgrzewania na odkształcenia cieplne i zapas na odkształcenia krzywych wytrzymałości.

Przeanalizujmy model dr Mariana Bala z AGH dla stali energetycznych 10H2M. Załóżmy, że spoina odkształci się termicznie o L1. Z wykresu na rysunku 1 wynika, że spoina pęknie w punktach B,C,D.

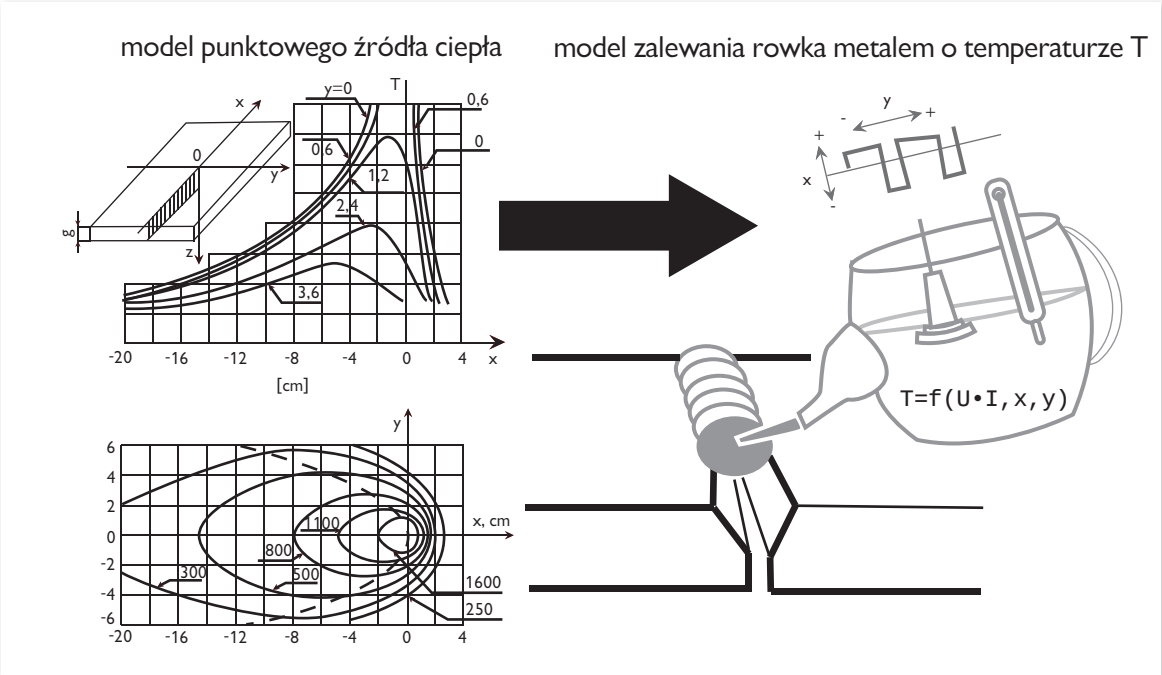
Jeżeli podgrzejemy miejsce spawania na szerokości 150 mm od złącza to odkształcenie zmniejszy się o ΔL i wyniesie L2. Z wykresu wynika, że podgrzewanie spowoduje pęknięcie w punkcie D. Z drugiej strony, podgrzanie spowoduje mniejsze zahartowanie i krzywa D zamieni się na krzywą C, co spowoduje, że spoina nie pęknie lecz będzie miała mniejszy zapas na odkształcenie. Jeżeli miejsce spawania było by wcześniej obrabiane plastycznie na zimno to ta obróbka spowoduje utratę zapasu na odkształcenie (bardziej strome krzywe wytrzymałości z rys 1) i spowoduje to pęknięcie spoiny pomimo podgrzewania. Dlatego Urząd Dozoru Technicznego nie dopuszcza spoin na „kolanach", a ich odległość od miejsca odkształceń plastycznych na zimno powinna wynosić 150 mm.

## Kontrola ilościowa procesów cieplnych spawania na etapie projektowania

Jednym z etapów projektowania jest dopuszczanie technologii do spawania na podstawie norm europejskich i ISO. Obliguje to wykonawcę do przeprowadzenia prób spawania i pełnego badania wytrzymałości płyt próbnych i określenie parametrów spawania i energii liniowej, przy której wyniki wszystkich prób będą pozytywne. Dopuszczone są wówczas parametry spawania, przy których energia liniowa wynosi – od 0,8 energii liniowej spawania w pozycji naściennej, do 1,2 energii liniowej spawania w pozycji pionowej.

Można się zastanawiać dlaczego normy europejskie wprowadziły pojęcie energii liniowej i skąd ono się wzięło, i czy kontrola energii liniowej zawsze jest słuszna. Poniżej spróbujemy przybliżyć tę sprawę.

Kontrola procesów cieplnych spawania opiera się na rozwiązywaniu równań różniczkowych wymiany ciepła podczas spawania. W latach 70-tych pojawiły się prace opisujące procesy rozchodzenia się ciepła poprzez rozwiązywanie równań wymiany ciepła. Ponieważ w przypadku topienia metalu problem jest dosyć trudny, gdyż rozwiązania takich równań różniczkowych udaje się uzyskać stosunkowo prosto dla funkcji liniowych, pominięto bardzo istotny element – nieliniowe wprowadzenie ciepła topienia. Dla dociekliwego fizyka byłoby to niedopuszczalne, lecz względy praktyczne i możliwość wyliczania szybkości chłodzenia i przewidywania hartowania się strefy wpływu ciepła zwyciężyły. O dziwo,




rys. 2 Stary i nowy model analizy procesów cieplnych spawania

matematycy wykonujący obliczenia cyfrowe metodą elementów skończonych, zamiast próbować zbliżyć się do rzeczywistości, próbowali dopasować funkcję „od tyłu", wstawiając wirtualny rozkład temperatury łuku. Było to możliwe dlatego, że w latach 80-tych tylko obecny rektor UJ, prof. Musioł dysponował stanowiskiem do badania rozkładu temperatury łuku. Przy istniejących wtedy komputerach „Odra", pomiary fotopowielaczem trwały kilka godzin, a obliczenia – kilka tygodni.

Dopiero niedawno pojawiły się laserowe techniki pomiaru punktowego temperatury łuku w czasie rzeczywistym, gdzie dwa promienie lasera barwnikowego zderzają się, tworząc jeden strumień, który niesie informację o punktowej temperaturze łuku elektrycznego.

Z punktu widzenia funkcjonowania mózgu łatwiejsze do analizy rozwiązania analityczne bardziej trafiają do inżynierów niż obliczenia numeryczne. Duże uproszczenia rozwiązań teoretycznych pomagały zwykle rozwiązać bieżące problemy, ze względu na swoją prostotę. Jednak z uwagi na to, że umysł ścisły powtarzając niektóre, nawet nieprawdziwe wzory, tak się do nich przyzwyczaja, że bierze je za pewnik, więc rozwój teorii procesów cieplnych spawania został zablokowany na długie lata.

Światowe koncerny naftowe robiące badania podstawowe w oparciu o specjalistów nie związanych ze spawaniem, mogły dzięki temu utrzymać dominującą pozycję na rynku spawania stali kwasoodpornych, gdyż inżynierowie spawalnicy z konkurencyjnych firm zmniejszali energię liniową zamiast tak szkolić spawaczy, aby przy tej samej energii liniowej zwiększać przekrój spoiny, czyli obniżać temperaturę jeziorka spawalniczego ciepłem topienia drutu.

Aby ocenić wpływ ciepła topienia na metalurgię należy ocenić stosunek dostarczonej energii do energii zużytej na topienie spoiny.

$$\frac{Q}{Q_{topienia}} = \frac{\mu * U * I}{S * V_{sp} * C_v * \rho} = \frac{\mu}{C_v * \rho} * \frac{U * I}{S * V_{sp}}$$

$$\frac{Q}{Q_{\text{topienia}}} = \frac{\mu}{C_v} * E_m = \frac{\mu * E_{liniowa}}{S * C_v * \rho}$$

$$Q - Q_{topienia} = \frac{dm}{dt} * C_{wl.} * (T - T_{topienia})$$

gdzie:

Q- ciepło dostarczone; Qtopienia- ciepło potrzebne do stopienia spoiny;

$E_m$ – ilość energii zużytej na wykonanie 1kg spoiny;

$E_{liniowa}$ – energia liniowa;

U- napięcie łuku; I- prąd spawania; S- przekrój poprzeczny spoiny;

$V_{sp}$ – szybkośc spawania; Cv – ciepło topienia; ρ - gęstość; μ- sprawność

$C_{wł.}$ – ciepło właściwe

Odzwierciedlenie tych wzorów przedstawia amerykańska norma naftowa (Rys. 3).

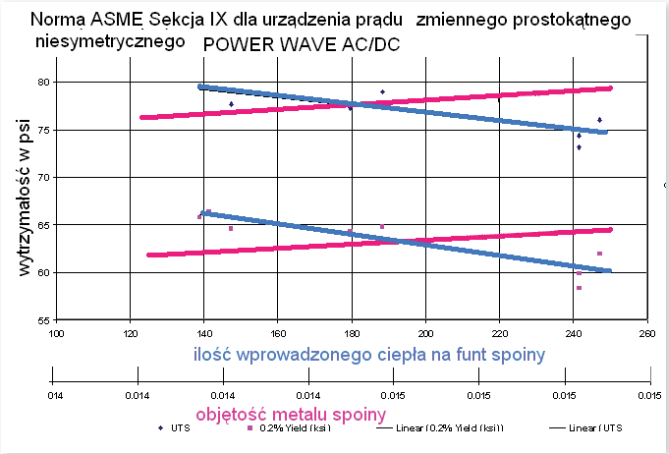
Przy stałej energii liniowej wytrzymałość wzrasta wraz ze wzrostem objętości ściegu czyli jego przekroju. W tradycyjnych spawarkach ilość stopionego drutu zależała od prądu spawania i przy ustalonej energii liniowej przekrój ściegu też był ustalony. Nowe urządzenia prądu zmiennego niesymetrycznego pozwalają zmieniać przekrój ściegu, przy tej samej energii liniowej E:

$E_{liniowa\ 1}$= 0,8 x U x I/ Vsp.

Rys. 3 prezentuje te nowe możliwości urządzeń spawalniczych.

Warto się zastanowić, dlaczego spawania termitowego szyn o bardzo dużej energii liniowej (krótki czas zalewania formy) nie udało się wyprzeć spawaniem elektrycznym. Zalewanie formy ciekłym metalem o temperaturze topienia jest podobne do ciągłego odlewania stali. Pomimo polewania wodą wlewków instalacji ciągłego odlewania stali nic się nie dzieje. Podobnie zalewanie

Rys. 3 Zależność wytrzymałości od ilości ciepła wprowadzonego na jednostkę masy spoiny oraz zależność wytrzymałości przy stałej energii liniowej od objętości metalu spoiny




rowka spawalniczego pokazane na rysunku 2 nie powinno wpływać na strukturę spoiny i strefy wpływu ciepła. Dzieje się tak ze względu na dużo większą przewodność ciepła stali zakrzepniętej niż stali ciekłej. Dopiero podwyższenie temperatury zalewania ciekłym metalem powoduje cykliczność krzepnięcia i przegrzewanie strefy wpływu ciepła. Dlatego wzrost energii liniowej z równoczesnym wzrostem przekroju spoiny poprzez wzrost szybkości stapiania nie powinien zwiększać średniej temperatury jeziorka i wpływać na własności spoiny. Można było więc ustalać energię liniową przez kontrolowanie ilości ściegów spoiny.

Na pole powierzchni przekroju wpływa szybkość topienia drutu i głębokość wtopienia. Tradycyjne urządzenia spawalnicze dawały stałą szybkość topienia, co oznaczało, że ilość stopionego drutu była zależna od prądu spawania i przekrój spoiny przy tej samej energii liniowej nie ulegał zmianie.

$$S * V_{sp} = A * I$$

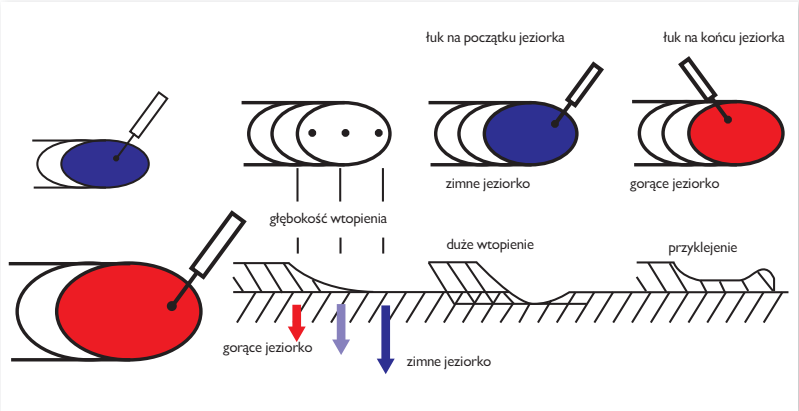
$$\frac{Q}{Q_{topienia}} = \frac{\mu * U * I}{A * I * C_v * \rho} = \frac{\mu}{A * C_v * \rho} * U$$

Jak wynika z powyższego wzoru przy tradycyjnych urządzeniach spawalniczych wytrzymałość połączeń spawanych będzie zależała wyłącznie od napięcia, które w tych urządzeniach zmienia się w niewielkim zakresie. Dopiero zastosowanie funkcji ARC Force zmniejszające w sposób dynamiczny napięcie łuku wraz ze wzrostem prądu pozwala na uzyskanie złotej barwy ściegów ze stali wykonanych metodą MAG.

## Projektowanie techniki spawania

Dawniej zwiększenie szybkości topienia można było uzyskać poprzez zamianę drutu pełnego na stopiwo w postaci rurki, o większej powierzchni topienia, czyli drutu proszkowego. Dlatego drutami proszkowymi można było spawać większymi energiami liniowymi i uzyskiwać dobrą udarność w niskich temperaturach i mniejszą szerokość strefy naprężeń spawalniczych rozciągających (równych granicy plastyczności). Możliwość regulacji balansu i offsetu przebiegu prądu zmiennego prostokątnego, niesymetrycznego, umożliwia regulację głębokości wtopienia i szybkości stapiania drutu, a więc przekroju spoiny przy tej samej energii liniowej.

Istniały też inne, mało stosowane przez nadzór, a wykorzystywane przez ekspertów spawania, wizualne sposoby zwiększenia przekroju spoiny przy tej samej energii liniowej (pokazane na rys.4). Pierwszy sposób to znacz-




Rys. 4. Wpływ położenia łuku w stosunku do jeziorka na temperaturę łuku i głębokość wtopienia

ne skrócenie łuku przy spawaniu TIG. Drugi sposób to zmiana położenia łuku w stosunku do jeziorka przy spawaniu MAG i MIG.

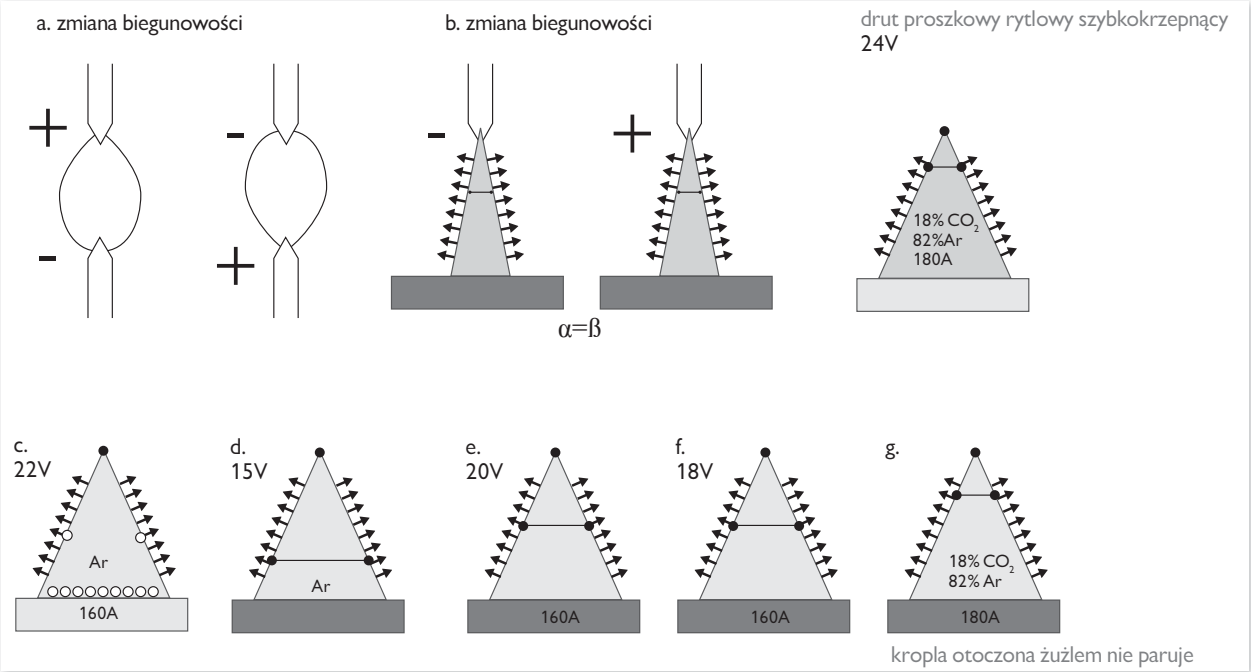
Jak wynika z rysunku 4, szerokość jeziorka można kontrolować nie tylko przez długość łuku, ale również przez kąt rozwarcia. W spawaniu półautomatycznym GMAW wielkość jeziorka możemy kontrolować napięciem łuku i kątem rozwarcia łuku. Napięcie łuku zależy od pola powierzchni bocznej łuku, która jest powierzchnią strat energii promieniowania (zakłada się, że w środku łuku promieniowanie powoduje jonizację i nie wychodzi na zewnątrz).

Zmniejszając kąt rozwarcia przy tym samym napięciu, zwiększamy wielkość jeziorka i jego temperaturę. Wynika to z zasad termodynamiki, że ciepło nie ginie i służy do topienia

Jak ważnym problemem w projektowaniu jest kryterium odkształceń i możliwości zgubienia odkształceń cieplnego skurczu spoiny podczas montażu przekonali się projektanci mostów. Jeżeli półka dźwigara jest wykonana z trzech nakładek po 40 mm (taką grubość dopuszcza norma mostowa) to aby pospawać doczołowo blachy wszystkich nakładek trzeba zaprojektować wstawki w wyżej położonych nakładkach. Jeżeli przyjmiemy odległość 150 mm to nakładki będą miały długości odpowiednio: 300 i 600 mm i będzie to za mało, aby zgubić skurcz spoiny blachy o grubości 40 mm, wynoszący 8 mm. Aby spoiny nie popękały trzeba założyć odległość do spoin pachwinowych nakładek blokujących odkształcenia – 300 mm, co daje długość nakładek: 600 i 1200 mm, a więc dwa razy więcej niż wynikałoby to z przepisów UDT. Oznacza to również, że spoiny nakładek powinny być niedospawane do miejsca układania spoiny doczołowej na długości 300 mm. Poza tym, nie wszystkie ściegi przenoszą to samo obciążenie i w takim samym stopniu podlegają zahartowaniu. Najbardziej odkształcony jest przetop i on też jest najbardziej zahartowany, co powoduje, że w przetopie mogą wystąpić mikropęknięcia, które podczas obciążenia

podłoża i grzania jeziorka spawalniczego. Ponieważ topienie następuje w wyniku fizycznego kontaktu gorących gazów z podłożem, ilość stopionego podłoża zależy od przepływu gorących gazów (topienie przez przewodnictwo cieplne możemy pominąć), którego miernikiem jest przepływ jonów, czyli prąd elektryczny ( przy stopniu jonizacji 5%; x 20).

Jeżeli nie zmieniamy przepływu, a tylko odsuwamy blachę (wydłużamy łuk) to wysokość topionego walca czyli głębokość wtopienia powinna maleć. W rzeczywistości mechanizm jest bardziej skomplikowany. Składowa pionowa ciśnienia odsuwa ciekły metal na boki i pozwala gorącym gazom (rys. 5) docierać do podłoża i topić coraz głębsze warstwy. Składowa pozioma transportuje ciekły metal do nadlewu (spawanie w prawo, metodą ciągnięcia) lub przed łuk i wtedy składowa ciśnienia ugina ciekły metal z topionego drutu, gazy nie docierają do podłoża i zamiast topić i chłodzić ciepłem topienia, grzeją jeziorko (spawanie w lewo, metodą ciągnięcia). Przy spawaniu MIG najkorzystniejszy jest kąt odchylenia od pionu 7°. Teorię, że przy spawaniu łuk elektryczny służy tylko do wywołania różnicy temperatur, a różnica temperatur napędza ruch gorących gazów od gorącego obszaru w pobliżu elektrody do zimnej blachy, potwierdza rysunek 5. Przy zmianie biegunowości powinna wystąpić zmiana kształtu łuku jak na rysunku 5a. Rys. 5b pokazuje, że taka zmiana nie nastąpiła i łuk nadal rozszerza się w kierunku blachy.




Rys. 5 Wpływ długości łuku i kąta rozwarcia łuku na wielkość jeziorka i napięcie łuku

Kąt rozwarcia łuku powstaje w wyniku zderzania się gorących gazów przemieszczających się w kierunku blachy. Każde zderzenie wprowadza składową prostopadłą prędkości do kierunku ruchu. Stąd kąt rozwarcia zależy od ilości zderzeń, czyli temperatury i wielkości zderzających się cząstek. Ochłodzenie łuku dużą ilością przemieszczającego się metalu przy spawaniu drutem proszkowym metalicznym czy dodanie do argonu nawet niewielkiej ilości małych cząstek wodoru czy helu zawęża łuk (spawanie cienkich blach TIG).

Dodanie oparów składników stali nierdzewnej czy dużych cząstek pochodzących z drutu proszkowego lub $O_2$ lub $CO_2$ zwiększa prawdopodobieństwo zderzenia i rozszerza łuk. Przechodzenie kropli otoczonej żużlem podczas spawania drutem proszkowym (rys. 5g) uniemożliwia parowanie kropli stali nierdzewnej i nie zmienia parametrów spawania, które zazwyczaj wynoszą 180A i 24V (mieszanka 18%$CO_2$ i 82% Ar).

Zapobieganie parowaniu przy spawaniu A-TIG przez posmarowanie miejsca spawania aktywnymi pastami zapobiegającymi parowaniu zawęża łuk tak intensywnie, że głębokość wtopienia wzrasta z 3 do 6mm i przypomina spawanie plazmowe z zimnym jeziorkiem.

## Dobór metody i techniki spawania

Wprawdzie normy europejskie traktują wszystkie metody spawania równorzędnie lecz skłonność niektórych metod do tworzenia określonych wad, duże niebezpieczeństwa jakie niosą za sobą przyklejenia w konstrukcjach obciążonych dynamicznie i trudność wykrywania tych przyklejeń metodami badań nieniszczących powoduje, że do konkretnego przypadku w zależności od odpowiedzialności i ceny wytwarzania należy dokonać specjalnej analizy w celu doboru specjalnej metody spawania. Dla przykładu do obciążeń dynamicznych jedyną możliwą metodą ze względu na dużą plastyczność jest metoda TIG lub ze względu na 6 razy większy przekrój warstwy przetopowej spawanie na podkładce ceramicznej drutem proszkowym z przygotowaniem rowka bez progu. W pozostałych przypadkach pozostałe metody możemy stosować tylko wtedy, gdy jest możliwość usunięcia warstwy graniowej i podpawania spoiny. W przypadku elementów automatyki hydraulicznej i pneumatycznej instalacji sterowanych komputerowo, aby uniknąć awarii poprzez zapychanie się tych elementów żużlem ze szlaki spoin jedyną metodą dynamicznego rozwiną się w pęknięcia. Dlatego najczęściej stosuje się wycinanie przetopu i podpawanie. W przypadku nakładek dźwigara mostu jest to niemożliwe i dlatego trzeba spawać kaskadowo, aby jeden ścieg wyżarzał drugi i skurcz strukturalny związany z przemianą alotropową stali (hartowanie pomiędzy 800 i 500°C) wystąpił gdy będą położone 3 ściegi, a więc przenoszenie obciążeń rozłoży się na większą i bardziej plastyczną powierzchnię przekroju poprzecznego.

Osobnym zagadnieniem są nowe generacje stali drobnoziarnistych o 3, a nawet 5 razy większej granicy plastyczności od stali 18G2A. W tym przypadku ważny jest wodór atomowy, który powstaje w temperaturze łuku z wody, która wykrapla się z otoczenia. Wodór ten w stali jest „duchem" (nie ma objętości) i przemieszcza się pod włos, do miejsca, gdzie są największe naprężenia wewnętrzne, a więc pod spoinę. Po przekroczeniu dopuszczalnej wartości wodór w miejscach rozwalcowanych wtrąceń łączy się w cząsteczki H2, które posiadają objętość i rozsadzają strukturę materiału, powodując pękanie schodkowe w skali mikro (przypominające pęknięcia zmęczeniowe). W tym celu należy przewidzieć podgrzewanie osuszające palnikiem do 100°C i wygrzewanie po spawaniu, w temperaturze 250°C przez 2 godziny (przy grubych i masywnych blachach wystarczy zaizolować spoinę). Poza tym, wytrzymałość tych stali opiera się na drobnym ziarnie, które przy zbyt dużej ilości wprowadzonego ciepła mogą się rozrosnąć, a powstające wysepki kruchego ferrytu delta w strukturze mikroskopowej mogą spowodować pękanie. Z tą różnicą, że trzeba zmienić diametralnie przyzwyczajenia wykonawcy i zamiast grzać obszar spawania, w skrajnych przypadkach chłodzić go sprężonym powietrzem. Te wszystkie uwagi należy wpisać w dokumentacji, w uwagach. Inaczej wykonawca nie zatrudni nadzoru spawalniczego i spawaczy o odpowiednich kwalifikacjach i konstrukcja ulegnie awarii „na etapie projektowania". Dlatego warto czytać normy europejskie i szkolić osoby weryfikujące dokumentację pod względem spawalniczym.

dopuszczalną do spawania przetopów jest metoda TIG. Jeżeli chodzi o konstrukcje obciążone dynamicznie to przy ręcznym spawaniu zaleca się spawanie elektrodą otuloną lub drutem proszkowym, gdyż ze względu na przechodzenie kropli otoczonej żużlem przy zbyt wolnym prowadzeniu uchwytu, zamiast niebezpiecznych i trudno wykrywalnych radiograficznie przyklejeń, powstają łatwo

wykrywalne metodami nieniszczącymi żużle. W niektórych zakładach, jak stocznie, do spawania elementów, do których mocowane są haki dźwigów dopuszcza się tylko spawanie elektrodą otuloną. Przy spawaniu nowoczesnych stali kwasoodpornych i superwytrzymałych stali drobnoziarnistych niesłychanie ważna jest kontrola techniki spawania. Wielu zleceniodawców wymaga od biur projektowych nadzoru autorskiego, toteż bez podstawowej wiedzy inżynier konstruktor jest wówczas bezradny.

Poniżej, w ostatniej części naszego opracowania, podamy podstawowe wytyczne, które pozwolą poruszać się w tym obszarze. Wytyczne te można również dołączać do dokumentacji, co pozwoli wykonawcom na łatwiejsze dostosowanie się do zasad funkcjonujących na światowym rynku.

## Technika spawania TIG stali austenitycznych

Spawanie blach austenitycznych dla przemysłu lotniczego wymaga bardzo dużej precyzji w utrzymaniu krótkiego łuku (7V zamiast tradycyjnych 15V), precyzyjnego prowadzenia łuku na początku jeziorka i precyzyjnego dodawania drutu. Dla przykładu spoina pachwinowa blach o grubości 1 mm powinna być tak prowadzona, aby jeziorko było na tyle zimne, by ciepło nie przechodziło na drugą stronę i nie powstawał korozyjny meszek, mimo braku gazu formującego. To dla wielu technologów wydaje się niemożliwe.

Przy spawaniu grubszych rur (np. dla przemysłu farmaceutycznego i spożywczego) przetop należy wykonywać krótkim łukiem pilnując, aby drut cały czas dotykał jeziorka i aby nie było na przetopie nierówności umożliwiających gromadzenie się bakterii. W przypadku układania lica źródłem impulsowym, drut należy dodawać po bokach jeziorka w czasie trwania prądu bazy. Nie należy najeżdżać końcem elektrody nad krawędź rowka tylko trzymać się w pewnej odległości od niego. Utrzymywanie elektrody w pewnej odległości od krawędzi podczas spawania grubościennych rur hydraulicznych zwiększa odbieranie ciepła przez podłoże (kąt odprowadzenia ciepła), a dodawanie drutu po bokach obniża temperaturę jeziorka, co zapobiega spływaniu przy dłuższym czasie nagrzewania podłoża do temperatury zwilżalności. Zapobiega to powstawaniu podtopień w pozycjach przymusowych.

## Technika spawania MAG i MIG stali austenitycznych

Teoretycznie możliwych jest sześć metod spawania stali austenitycznych metodą MAG: bez pulsu, z pojedynczym pulsem, z podwójnym pulsem, drutem pełnym lub proszkowym.

W przypadku stali austenitycznych o małej przewodności cieplnej przy spawaniu drutem pełnym, ze względu na wygląd spoiny (brak podtopień), pulsacja prądu nagrzewająca podłoże do temperatury zwilżalności jest obowiązkowa. Podwójny puls obniża temperaturę jeziorka wymuszając rozbudowaną na boki krystalizację (zazębianie się kryształów), co objawia się regularną łuską. Szybko topiąca się rurka drutu proszkowego poprzez ciepło topienia drutu obniża temperaturę jeziorka i poprzez duże rozwarcie łuku nagrzewa podłoże do temperatury zwilżalności (brak podtopień), co powoduje, że stosowanie pulsacji w zasadzie nie jest potrzebne.

Spawanie z podwójnym pulsem ze względu na zbyt duże obniżanie temperatury jeziorka jest wręcz niewskazane. Ze względu na kąt rozwarcia łuku i szybkość stapiania drutu, technika spawania gołym drutem różni się od techniki spawania drutem proszkowym. Drutem gołym wykonujemy zakosy w tempie walca wiedeńskiego z przytrzymaniem po bokach, a drutem proszkowym wykonujemy 3 razy szybsze i węższe ruchy zakosowe na początku jeziorka

(przypominające ruchy wycieraczek w czasie silnego deszczu). Dotychczas ze względu na energię liniową starano się stosować spawanie bez zakosów, jednak posługując się energią masową można tak dobrać kształt zakosów, że parametry wytrzymałościowe spoin zakosowych mogą być wyższe niż spoin ze ściegami prostymi. W AGH wykonano badania potwierdzające tę tezę, ale ze względu na wszechobecne poglądy na temat wpływu energii liniowej na udarność złączy w niskich temperaturach, nie były one publikowane w Polsce. Spawanie ściegami prostymi polega na prowadzeniu końca elektrody w największym zagłębieniu (pomiędzy ścianką, a poprzednią warstwą lub pomiędzy ściegiem, a poprzednią warstwą) i obserwowaniu obu krawędzi jeziorka spawalniczego. Przy zamykaniu warstwy, jedną krawędź jeziorka prowadzimy po grzbiecie poprzedniego ściegu, a drugą krawędź (gładkie lico warstwy) prowadzimy tak, aby przetopić krawędź rowka na głębokość 1mm. Ze względu na technikę spawania rur w pozycjach przymusowych ważne jest, aby temperatura międzyściegowa nie przekroczyła 250°C i aby dyszą nie dotknąć jeziorka (zassanie metalu jeziorka i spłynięcie). Przy spawaniu grubych blach i usztywnionych konstrukcji stale austenityczne należy spawać w zasadzie drutami proszkowymi rutylowymi szybko-krzepnącymi.

## Technika spawania elektrodą otuloną stali austenitycznych

Elektrody zasadowe ze względu na szybsze topienie się rdzenia niż otuliny pozwalają na zanurzanie elektrody w jeziorku spawalniczym bez gaszenia łuku elektrycznego, a więc spawania ujemnymi długościami łuku (zgodnie z obowiązującą nomenklaturą). Spawanie łukiem zanurzonym zwiększa szybkość stapiania podłoża, a tym samym obniża temperaturę jeziorka i mieszanie się stopiwa z podłożem. Dlatego, gdy metoda TIG, ze względu na szybkość spawania nie może być zastosowania, a metoda MIG nie daje takiej udarności w niskich temperaturach, jedyną możliwą metodą spawania zbiorników na ciekły argon jest spawanie elektrodą zasadową.

*Ryszard Jastrzębski*
Instytut Łączenia Metali Kraków

*zdjęcia: Mariusz Jaworski*
SPAW-SERWIS

**Literatura**

R. Jastrzebski, B. Yalinkilicli, M. Cenin, G. Padula *"The possibilities of rusing space technology in welding"*, str. 430-495, materiały konferencyjne corocznej konferencji Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa IIW Osaka, 12-14 czerwiec 2004r

L. Verwaerde, R. Katiyar *„Wpływ sterowania charakterystyką prądu na kształt spoiny i własności mechaniczne stopiwa"*, Przegląd Spawalnictwa Nr 7/8 2009 str. 18-23

Zielińska Sylwia: *„Własności fizyczne plazmy MIG-MAG"* rozprawa doktorska Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ 2005r.

M.Sakuma, R.Tsuboi, K.Kubo, S.Asai: *"Development of welder's training support system with visual sensors"*, str. 103-108, materiały konferencyjne corocznej konferencji Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa IIW Osaka, 12-14 czerwiec 2004r

A. Jastrzębski, Edmund Tasak: *„Wpływ pulsacji łuku MIG na strukturę stopów aluminium"* Przegląd Spawalnictwa Nr.7-8/ 2009 str. 7-10

W. Lucas, J.Smith, C.Balfor, DBertaso, G.Melton: *„Wizyjna kontrola rozmiaru jeziorka spawalniczego w czasie rzeczywistym"* Przegląd Spawalnictwa Nr 1/2009 str. 11-16

J. Łapanowski: *„Własności i spawalność stali dwufazowych stali odpornych na korozję typu duplex"* Przegląd Spawalnictwa Nr 10/2007, str. 35-40

W. Lucas, D. Bertaso: *„Zastosowanie spawania A-TIG i spawania plazowego w celu zwiększania wydajności"*, Przegląd Spawalnictwa Nr.12/2007, str 29-33