

Marek Stankiewicz
Graham Holloway
Adam Marshall
Zhuyao Zhang
Benedykt Ślęzak

Próba udarności Charpy'ego i parametr Lateral Expansion w ocenie materiałów spawalniczych dla potrzeb kriogeniki

Charpy impact test and Lateral Expansion parameter in welding consumables evaluation for cryogenic application

Streszczenie

W publikacji poruszone zostały kwestie związane z charakterem pęknięcia metali, zdolności absorpcji energii dynamicznej i samohamowania pęknięć. Omówiono podstawy próby udarności metali i stopów sposobem Charpy'ego, z uwzględnieniem różnic w amerykańskim i europejskim wariantach próby. Podkreślono wady i zalety sposobów oceny ciągliwości przelomów udarnościowych opartych na udziale przelomu plastycznego SFA i rozszerzeniu poprzecznym LE. W dalszej części publikacji przedstawiono materiały spawalnicze firmy Metrode przeznaczone do zastosowań kriogenicznych oraz ich właściwości ze szczególnym uwzględnieniem KV i LE w temperaturze -196°C .

Abstract

In the Charpy impact test three key measurements be made – total absorbed energy, Shear Fracture Area SFA and Lateral Expansion LE. However, although these three magnitudes have been available from the Charpy test, two of them SFA and LE have been just lately launched in Europe along with new standard EN ISO 148, which combines both American (ASTM E23) and European (EN 10045) regulations. In this paper principles of the impact tests and ductile-brittle fracture characterization are provided as well as comparison between American and European variants of the Charpy impact test.

The second part covers specialist and the most demanding area for welding consumables for joining 304L and 316L stainless steel that are subject to service temperatures down to -196°C . The dedicated range of controlled ferrite 'CF' consumables manufactured by Metrode is also described and some of the applications for which they have been use are highlighted.

Podbudowane teoretycznie przez mechanikę pęknięcia badanie udarności metodą Charpy'ego znajduje wciąż nowe obszary zastosowania jako tania, łatwa i szybka metoda oceny odporności materiałów

i ich połączeń spawanych na pęknięcie w obecności korbów zewnętrznych i oddziaływań dynamicznych. Próba udarności Charpy'ego ma charakter umowny i klasyfikowana jest w kategorii prób technologicznych. Wyznaczane w niej wielkości nie są stałymi materiałowymi, tzn. mogą być porównywane wyłącznie z wynikami uzyskanymi na takich samych próbkach i w tych samych warunkach. Nie można na ich podstawie dokonywać żadnych obliczeń wytrzymałościowych. Jednakże ogromna ilość danych porównawczych

Marek Stankiewicz – OBR Budowy Urządzeń Chemicznych CeBeA, Kraków, **Graham Holloway**, **Adam Marshall**, **Zhuyao Zhang**, **Benedykt Ślęzak** – Metrode Products Ltd. A Lincoln Electric Company.

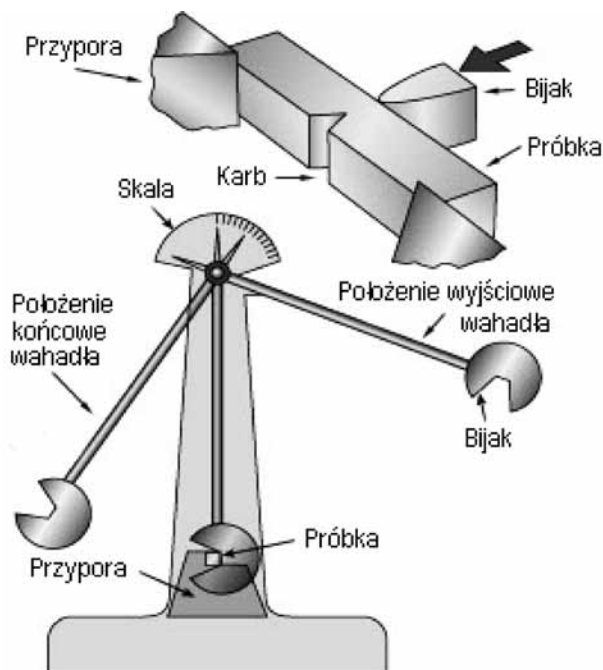
powoduje, że badanie udarności metodą Charpy'ego jest najbardziej podstawowym narzędziem do oceny kruchości metali i stopów oraz wpływu na nią różnorodnych czynników.

Pękanie metali. Próba udarności Charpy'ego w wariacie europejskim i amerykańskim

Schemat konstrukcji młota Charpy'ego i zasadę próby przedstawiono na rysunku 1. Ze skali młota, wyświetlacza elektronicznego lub ekranu komputera sprzężonego z młotem odczytuje się zużyta na złamanie próbki część energii początkowej wahadła. Wielkość tę nazywamy *pracą* lub *energią łamania*, która jest miarą zdolności materiału do absorpcji energii oddziaływania dynamicznego.

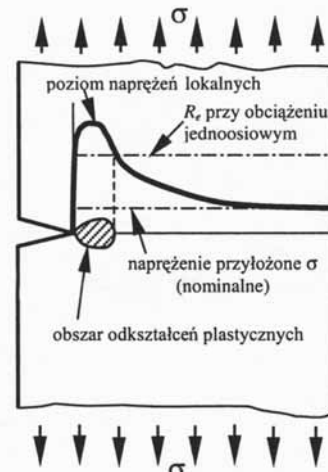
Metale i ich stopy pękają wskutek dynamicznego obciążenia w następujący sposób:

- z przelomem całkowicie plastycznym, absorbując dostarczoną energię. Pęknięcie ma charakter samohamowny. Po ustaniu siły je wywołującej ulega samorzutnemu zatrzymaniu;
- z przelomem całkowicie kruchym, absorbując znikomą część dostarczonej energii. Pęknięcie propaguje z prędkością rozchodzenia się dźwięku w metalu lub stopie i ma katastroficzny charakter;
- z przelomem mieszanym plastyczno-kruchym. Wielkość zaabsorbowanej energii i zdolność wyhamowania postępującego pęknięcia zależy od proporcji udziału mechanizmu kruchego i plastycznego. Udowodniono na drodze doświadczalnej, że pęknięcia zawierające 70÷90% przelomu ciągliwego zatrzymują się samorzutnie [1].

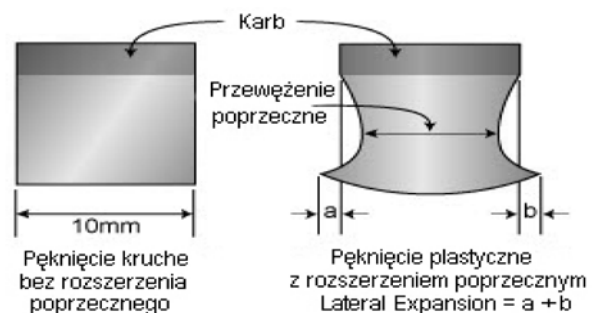


Rys. 1. Młot udarnościowy Charpy'ego
Fig. 1. Charpy Impact Test Machine

Usytuowanie karbu w próbce w stosunku do miejsca uderzenia bijaka młota odzwierciedla najmniej korzystne warunki obciążenia, czego konsekwencją jest złamanie próbki przy najmniejszej pracy łamania. Nacięty w próbce karb powoduje koncentrację naprężeń pod jego dnem (rys. 2). Pękanie rozpoczyna się za obszarem odkształceń plastycznych jak na rysunku 2 i rozprzestrzenia się ku podstawie karbu, bocznym powierzchniom próbki oraz miejscu uderzenia bijaka. Stopniowo z jego propagacją ku ścianom próbki zwiększa się zdolność plastycznego odkształcania materiału. Pod powierzchnią bocznych ścian próbki obserwowane są obszary odkształceń plastycznych zwane w mechanice pęknięcia *przypowierzchniowymi odkształceniami plastycznymi pod dnem karbu*. Jest to zjawisko fizyczne związane z liczbą stopni swobody odkształcania materiału, dla próbek o szerokościach znormalizowanych niezależne od szerokości próbki. Odkształcenie próbki osiąga kulminację na przecięciu tylnych krawędzi próbki i linii uderzenia bijaka, w których to miejscach dokonuje się pomiaru rozszerzenia poprzecznego *Lateral Expansion* (rys. 3). Charakter rozwoju pęknięcia na ogół powoduje powstanie przelomu mieszanego, plastyczno-kruchego, który jest najczęściej spotykanym w badaniach udarności przypadkiem. Przelomy 100% plastyczne lub 100% kruche są tylko granicznymi przypadkami przelomu mieszanego. Mechanizm pęknięcia kruchego i plastycznego metali i ich stopów znacząco się różni i został opisany w [2].



Rys. 2. Koncentracja naprężeń pod dnem karbu [2]
Fig. 2. Stress Concentration at the Bottom of the Notch [2]



Rys. 3. Zasada pomiaru rozszerzenia poprzecznego (*Lateral Expansion*)
Fig. 3. Broken Charpy V-notched Impact Specimen Illustrating the Measurement of Lateral Expansion

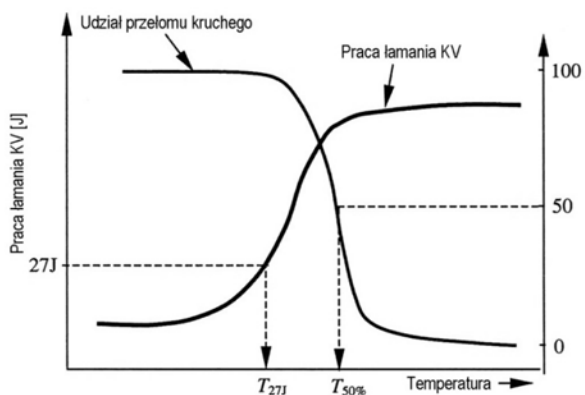
Metale i stopy o sieci krystalograficznej A1 regularnej, ściennie centrycznej (np. stale austenityczne, stopy niklu) z uwagi na wielość płaszczyzn poślizgu charakteryzują się wysokimi wartościami pracy łamania i małą wrażliwością na obniżanie temperatury. Nawet w temperaturze ciekłego azotu -196°C i niższej mają przełomy całkowicie plastyczne i zdolność całkowitego zatrzymania wahadła młota na próbce. Z tego względu są bezkonkurencyjne w zastosowaniach kriogenicznych. Niestety pojawienie się w mikrostrukturze spoin niezbędnego dla ochrony przed pękaniem na gorąco ferrytu δ wywołuje zauważalny spadek wartości pracy łamania, pomimo zachowania całkowicie plastycznego przełomu. Większe ilości ferrytu δ występujące np. w stalach duplex często ograniczają ich stosowanie do temperatury nie niższej niż -100°C .

Metale i stopy o sieci krystalograficznej A2 przestrzennie centrowanej (np. stale ferrytyczne) mają mniej płaszczyzn poślizgu i w związku z tym charakteryzują się większą skłonnością do kruchego pęknięcia i wrażliwością na obniżanie temperatury badania. Stabilna w wyższej temperaturze wielkość energii łamania odpowiadająca zakresowi plastycznemu z obniżaniem temperatury maleje, po czym znów stabilizuje się tym razem na niskim poziomie, odpowiadającym zakresowi kruchemu. Ilustruje to rysunek 4, a przedstawione na nim krzywe uzyskały miano *krzywych przejścia w stan kruchy* w oparciu o:

- pomiar pracy łamania KV;
- ocenę udziału przełomu kruchego na przekroju próbki.

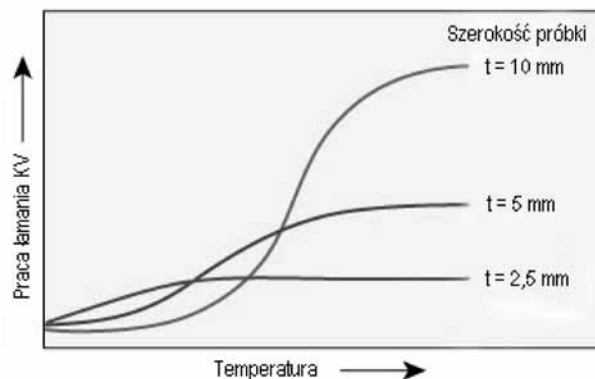
Na krzywych tych zaznaczono historyczne kryteria służące do wyznaczania tzw. *temperatury przejścia w stan kruchy*, którymi są przełom mieszany plastyczno-kruchy 50/50% oraz kryterium minimalnej dopuszczalnej pracy łamania KV_{\min} (na rysunku 4 dla przypadku $KV_{\min} = 27 \text{ J}$).

Kształt krzywej zależny jest od szerokości próbki, wskutek występowania przypowierzchniowych odkształceń plastycznych (rys. 5). Mniejszej szerokości próbki odpowiada mniejsza wielkość pracy łamania w wyższej



Rys. 4. Zasada wyznaczania temperatury przejścia w stan kruchy dla dwóch kryteriów: pracy łamania $KV = 27 \text{ J}$ i 50% udziału przełomu kruchego [2]

Fig. 4. Ductile-Brittle Transition Temperature Determined for Two Criteria: min. 27 Joules Absorbed Energy and 50% of SFA [2]



Rys. 5. Charakter krzywych przejścia w stan kruchy w zależności od szerokości próbki udarnościowej

Fig. 5. Plot of Absorbed Energy-Temperature Curves vs Width of Impact Specimen

temperaturze (prawa część wykresu), ale z drugiej strony obszar przypowierzchniowy odkształcony plastycznie pozostaje niezmienny, a maleje udział obszaru występowania przełomu kruchego (środek próbki). W skrajnym przypadku obszar kruchy zanika całkowicie, a mierzona praca łamania jest miarą zjawiska fizycznego. Wykonywanie badań udarności na próbkach cieńszych niż dopuszczone przez normy nie ma więc sensu technicznego, ponieważ uzyskany rezultat nie odzwierciedla w oczekiwany sposób właściwości materiału. Zatem, z tych samych względów, cienkościennie elementy są w dużo mniejszym stopniu narażone na katastroficzne pęknięcie kruche, które jest cechą elementów masywnych. Niektóre normy materiałowe dotyczące stali ferrytycznych przeznaczonych do pracy w obniżonej temperaturze, np. ASTM A333, nakazują dodatkowe obniżenie temperatury badania w przypadku próbek o małej szerokości w celu zniwelowania różnic wynikających z przebiegu krzywych przejścia w stan kruchy, co odpowiada lewej części wykresu z rysunku 5.

Podstawowym kryterium odniesienia uzyskanych wyników badania udarności jest minimalna wielkość pracy łamania zapewniająca niekatastroficzny charakter pęknięcia materiału. Na podstawie wieloletnich doświadczeń sformułowano takie kryteria dla różnych materiałów i ich połączeń. W przypadku najczęściej stosowanych stali konstrukcyjnych wielkość ta wynosi 27 J (rys. 4).

Termin badanie udarności sposobem Charpy'ego dotyczy zarówno europejskiej wersji tej próby wg EN 10045, jak i wersji amerykańskiej wg ASTM E23. Metody te poza kilkoma mniej istotnymi szczegółami różnią się promieniem wyokrąglenia bijaka. Stosowany w Europie bijak $R = 2 \text{ mm}$ zapewnia czysto trójpunktowy charakter zginania dynamicznego. Bijak zgodny z ASTM E23 o promieniu $R = 8 \text{ mm}$ i ostrych krawędziach powoduje, że początkowe zginanie trójpunktowe w dalszej fazie łamania próbki przechodzi w zginanie czteropunktowe. Koncentracja naprężeń pod dnem karbu w chwili uderzenia jest mniejsza, a co za tym idzie, mniejsza jest również głębokość obszaru odkształceń plastycznych u podstawy karbu przedstawiona na rysunku 2. Mieszany charakter zginania

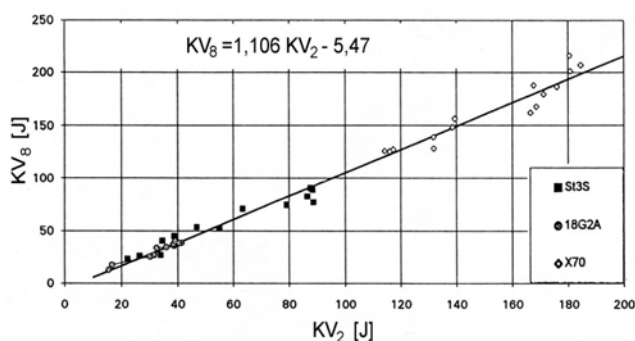
w amerykańskim wariancie próby udarności sprzyja ograniczeniu zasięgu strefy przypowierzchniowych odkształceń plastycznych, a to pozwala na obniżenie minimalnej znormalizowanej grubości próbki do 2,5 mm, wobec 5 mm obowiązujących w normie europejskiej. Umożliwia więc badanie udarności elementów o cieńszych ściankach i rur o mniejszych średnicach. Z tego samego względu w próbie wg ASTM E23 znacznie częściej mamy do czynienia z całkowicie przelamanymi próbkami z materiałów plastycznych.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań zależności pomiędzy pracą łamania próbek ze stali konstrukcyjnych badanymi obiema metodami: wg ASTM – KV_8 i wg EN – KV_2 w tych samych warunkach [3]. W przypadku próbek niskoenergetycznych KV_8 jest zauważalnie mniejsze od KV_2 . W przypadku próbek wysokoenergetycznych KV_8 jest zauważalnie większe od KV_2 . Zrównanie KV_8 i KV_2 następuje w materiałach o wartości pracy łamania ok. 52 J. Przedstawiony wykres opisuje dla wartości $6,5 \text{ J} \leq KV_2 \leq 200 \text{ J}$ liniowa zależność:

$$KV_8 = 1,106 \times KV_2 - 5,47 \text{ [J]} \quad (1)$$

Niedawno opublikowana norma EN ISO 148 *Metallic materials – Charpy pendulum impact test* standaryzuje w jednym dokumencie obie metody: europejską i amerykańską. Nie stanowi jednak o równoważności obu metod, z uwagi na różnice w mierzonych wielkościach KV. Niestety stawia większość europejskich laboratoriów w niezręcznej sytuacji, ponieważ docelowo nakłada na nie obowiązujący od wielu lat w ASTM E23 wymóg weryfikacji młotów udarnościowych w oparciu o próbki wzorcowe, niedostępne na rynku europejskim. Sposób ten pozwala wykryć i wyeliminować przypadkowe pochłanianie części energii wahadła wskutek niedostatecznego dokręcenia połączeń śrubowych podzespołów młota, które powodują zawyżanie mierzonej wartości pracy łamania KV nawet o kilka J. Klasyczny sposób sprawdzania stosowany w Europie nie daje takiej możliwości.

Próba udarności z biegiem lat ewoluuje, dostosowując się do zmieniającego się otoczenia technicznego, pomimo iż jej fundamenty pozostały niezmiennie. W ciągu ostatnich 30 lat energie potencjalne



Rys. 6. Zależność pracy łamania KV_8 i KV_2 wybranych stali konstrukcyjnych [3]

Fig. 6. Dependence of Absorbed Energy KV_2 and KV_8 for Low Carbon Steels [3]

produkowanych młotów Charpy'ego do badań metali i stopów wzrosły od wartości 180 J aż do 600 J. Zmieniło się również podejście do drugiego kryterium próby udarności – oceny plastyczności przełomu badanych materiałów, a więc zdolności samohamowania pęknięć. Zmiany te są w dużej mierze konsekwencją coraz powszechniej stosowanej metalurgii próżniowej, pozwalającej bardzo głęboko zredukować zawartość najbardziej szkodliwych dla plastyczności stali domieszek siarki i fosforu do wartości ok. 0,005%. Słabo związane z osnową metaliczną, a w wielu przypadkach całkowicie niekoherentne siarczki stanowią w stopach żelaza tzw. *karby wewnętrzne*. Sposób ich oddziaływania jest analogiczny jak pokazano na rysunku 2, lecz zachodzi w skali mikroskopowej. Obecność umiarkowanej ilości wydzielań siarczkowych w stalach o przeciętnej czystości powoduje z jednej strony obniżenie wielkości pracy łamania KV w stosunku do stali wysokiej czystości, lecz z drugiej strony zwiększa zdolność do odkształcania plastycznego. Dalsza redukcja zawartości siarczków podwyższa wielkość pracy łamania KV, a więc poziom absorpcji dostarczonej energii przy oddziaływaniu dynamicznym, ale utrudnia uzyskanie przełomu ciągliwego, zmniejszając zdolność samohamowania powstałego już pęknięcia. Jest to opisywany w [2] tzw. *efekt siarczków*. Klasyczne podejście do kwestii przechodzenia metali i stopów w stan kruchy zaprezentowane na rysunku 4 w takich przypadkach nie sprawdza się, ponieważ wysokim wartościom KV towarzyszy przełom z dominującym udziałem obszaru kruchego.

Ocena rodzaju przełomów w badaniach udarności. Rozszerzenie poprzeczne *Lateral Expansion*

Opisane powyżej zjawisko to jedna z przyczyn, dla których prace nad unormowaniem sposobów oceny rodzaju przełomu w próbkach udarnościowych przebiegają tak powoli. Europejska norma EN 10045 o ocenie rodzaju przełomu nie wspomina ani jednym słowem, natomiast w praktyce dodatkowe wymagania techniczne zawarte w kontraktach handlowych nakładają obowiązek takiej oceny w badaniach udarności. Problemem jest niestety brak stosownego dokumentu odniesienia.

Norma ASTM E23 kwestię oceny rodzaju przełomu próbuje rozwiązać od 1956 r., lecz dopiero w 1981 r. pojawiły się w niej konkretne zapisy. Aktualne wydanie normy stanowi, że w badaniach komercyjnych ocena rodzaju przełomu nie jest wymagana, natomiast w badaniach o innym charakterze „są często dodatkowo określane”:

- procentowy udział przełomu plastycznego na przekroju złamanej próbki (ang. SFA – *Shear Fracture Area*);
- wielkość rozszerzenia poprzecznego (ang. LE – *Lateral Expansion*).

Inne przepisy techniczne, jak chociażby powszechnie stosowane w obrocie międzynarodowym przepisy ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sekcja VIII wymagają oceny plastyczności stali duplex i stali austenitycznych oraz ich połączeń spawanych na podstawie pomiarów wielkości rozszerzenia poprzecznego *Lateral Expansion*.

Norma ASTM E23 sugeruje możliwe do zastosowania metody oceny udziału przelomu plastycznego na przekroju złamanej próbki:

- przez bezpośredni pomiar na próbce wielkości obszaru kruchego i odczytanie z tabeli w załączniku do normy odpowiadającej mu wielkości udziału przelomu plastycznego;
- przez porównanie wyglądu przelomu ze zdjęciami zamieszczonymi w normie oraz wzorcami graficznymi jak na rysunku 7;
- metodą planimetryczną na powiększeniach obrazu przelomu;
- metodą skanowania powierzchni z cyfrową analizą obrazu.

Dokument ten nie rozwiązuje kwestii oceny przelomu w przypadkach mniej typowych:

- niestandardowego wyglądu przelomu w stalach o wysokiej czystości, który w warunkach obserwacji makroskopowej wygląda jak przelom kruchy, a jednocześnie wykazuje stosunkowo duże rozszerzenie poprzeczne;
- przelomów spoin austenitycznych z udziałem ferrytu δ i stali duplex, w których z obniżaniem temperatury przelom pozostaje wizualnie plastyczny, lecz wyraźnie maleje jego ciągliwość.

Ponadto z praktyki własnej oraz literatury [4] wynika za wyjątkiem analizy obrazowej pozostałe metody oceny obarczone są dużym błędem subiektywnym sięgającym nawet 20%, a dane odniesienia dotyczą wyłącznie próbek pełnowymiarowych ISO Charpy V-10, o typowych krzywych przejścia w stan kruchy jak na rysunku 4.

Zastosowanie komputerowej analizy obrazu eliminuje subiektywny błąd odczytu udziału przelomu plastycznego i kruchego oraz zapewnia dokładność pomiaru na poziomie nie mniejszym niż 0,3% [4], lecz nadal nie rozwiązuje opisanych powyżej kwestii.

Drugi wskaźnik oceny ciągliwości przelomu sugerowany przez ASTM E23 oraz EN ISO 148 – rozszerzenie poprzeczne *Lateral Expansion* jest największą wartością przyrostu szerokości próbki w miejscu jej uderzenia przez bijak, mierzoną na obu połówkach próbki (rys. 3). Niewątpliwą zaletą tego wskaźnika związanego z występowaniem przypowierzchniowych



Rys. 7. Wzorce graficzne do wyznaczania udziału przelomu kruchego i plastycznego na przekroju złamanej próbki udarnościowej
Fig. 7. Guide for Estimating Fracture Appearance, % SFA

odkształceń plastycznych jest częściowa niezależność od szerokości próbek znormalizowanych. Dopóki szerokość próbek nie będzie mniejsza od zasięgu odkształceń przypowierzchniowych, wielkość LE pozostanie niezmienna, niezależnie od tego, czy użyjemy próbek pełnowymiarowych, czy węższych. Pomiar LE nie wymaga identyfikacji przelomu, nie jest więc obciążony błędem subiektywnym. Można go dokonać za pomocą skanera powierzchni z cyfrową analizą obrazu, mierząc niezależnie obie połówki złamanej próbki i wyznaczając wartość $LE = a_{max} + b_{max}$, lub za pomocą przyrządu przedstawionego na rysunku 8, którego konstrukcję dokładnie opisano obu normach ASTM E23, jak i EN ISO 148. Przyrząd ten wymaga jednoczesnego pomiaru obu złamanych połówek i umożliwia bezpośredni odczyt a_{max} , oraz po odwróceniu próbki b_{max} , których suma daje wartość LE.

Żadna z tych norm nie narzuca obowiązującego sposobu pomiaru LE, pozostawiając tu pełną dowolność, np. użycia cyfrowej suwmiarki z funkcją zerowania wskazań. Na rysunku 9a przedstawiono empiryczną zależność pomiędzy LE a pracą łamania stali ferrytycznych, którą z dużą dokładnością można opisać równaniem:

$$LE = -2 \times 10^{-7} KV^3 + 7 \times 10^{-5} KV^2 + 8,5 \times 10^{-3} KV \text{ [mm]} \quad (2)$$

Na rysunku 9b przedstawiono natomiast analogiczną zależność dla złączy spawanych stali duplex, super duplex oraz austenitycznych stali Cr-Ni, opisywaną równaniem:

$$LE = 1,23 \times 10^{-2} KV - 1,20 \times 10^{-6} KV^2 \text{ [mm]} \quad (3)$$

W obydwóch przypadkach pierwszą część wykresu dla KV w zakresie 0÷100 J można z wystarczającą dokładnością opisać uproszczonym równaniem:

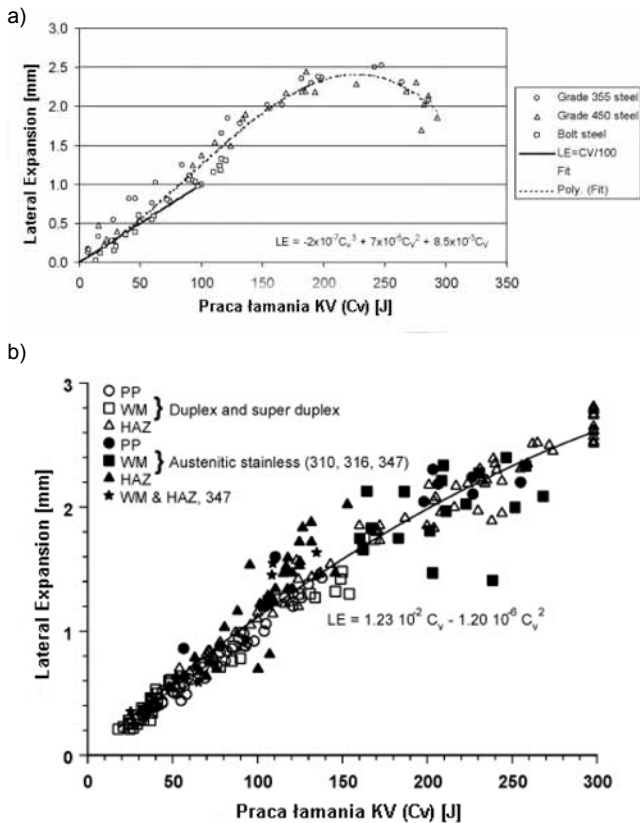
$$LE = KV/100 \text{ [mm]} \quad (4)$$

gdzie: KV wyrażone jest w [J].



Rys. 8. Przyrządy do wyznaczania wielkości rozszerzenia poprzecznego *Lateral Expansion* – rozwiązanie sugerowane przez ASTM E23 i EN ISO 148

Fig. 8. Lateral Expansion Gauge for Charpy Specimens acc. to ASTM E23 and EN ISO 148



Rys. 9. Empiryczna zależność *Lateral Expansion* LE i pracy łamania KV (Cv) [5, 6]: a) dla stali ferrytycznych; b) dla stali duplex i kwasoodpornych stali austenicznych Cr-Ni

Fig. 9. Empiric Dependence Between *Lateral Expansion* LE and Absorbed Energy KV: a) ferritic steels, b) duplex and stainless steels

Zaczerpnięte z prac [5, 6] wykresy z rysunku 9 i równania (2)-(4) pozwalają przewidzieć oczekiwaną wielkość LE i zweryfikować uzyskane własne wyniki pomiarowe.

Ekstremum LE na rysunku 9a pokazuje, że w stalach ferrytycznych nie da się w nieograniczony sposób zwiększać zdolności pochłaniania energii dynamicznej, tu wyrażonej przez wielkość KV, bez utraty ciągliwości materiału. Przebieg tego wykresu odzwierciedla skutki opisanego wcześniej efektu siarczków.

Brak konieczności rozróżnienia rodzaju przełomu predestynuje pomiar rozszerzenia poprzecznego *Lateral Expansion* do oceny ciągliwości przełomów stali ferrytycznych wysokiej czystości, stali duplex, kwasoodpornych stali austenicznych Cr-Ni oraz nadstopów na bazie niklu Ni, w której to grupie mieszczą się stopy stosowane w kriogenice.

Materiały dodatkowe do spawania stali austenicznych stosowanych w kriogenice

Jednym z obszarów zastosowania rozszerzenia poprzecznego LE jako miernika ciągliwości materiału w próbie udarności są instalacje przeznaczone

do pracy w temperaturach kriogenicznych. Typowym przykładem mogą być terminale ciekłego gazu ziemnego LNG (*Liquid Natural Gas*). Zbiorniki oraz elementy instalacji LNG eksploatowane są w bardzo uciążliwych warunkach. Podczas skraplania gaz ziemny zostaje oziębiony do temperatury ok. -161°C , w której jest przechowywany i transportowany. Konieczność przechowywania LNG w drogich zbiornikach kriogenicznych wymusza stosowanie różnych materiałów, w tym wspomnianych już wysokostopowych stali austenicznych oraz stopów na bazie niklu.

Zarówno materiały podstawowe, jak i materiały dodatkowe do spawania elementów instalacji kriogenicznych powinny charakteryzować się odpowiednio wysoką udarnością w temperaturze eksploatacji. Zgodnie z wymaganiami przepisów ASME wartość rozszerzenia poprzecznego LE nie może być mniejsza niż $0,38\text{ mm}$ ($LE \geq 0,38\text{ mm}$) zarówno dla materiałów podstawowych, jak i złączy spawanych.

Należy zaznaczyć, że badania udarności w grupie materiałów przeznaczonych do zastosowań kriogenicznych prowadzi się w większości przypadków w temperaturze ciekłego azotu -196°C . Schładzanie próbek do innych poziomów temperatury byłoby bardzo kłopotliwe i nieuzasadnione, biorąc pod uwagę fakt, że temperatura eksploatacji instalacji kriogenicznych w przeważającej większości jest wyższa od standardowej temperatury próby udarności (ciekłego azotu).

Jak już wspomniano, struktury w pełni austeniczne, ze względu na dużą ilość płaszczyzn poślizgu sieci krystalograficznej A1, charakteryzują się stosunkowo małą wrażliwością na obniżanie temperatury, z tego względu najwyższe wartości udarności w temperaturze kriogenicznej uzyskuje się właśnie dla stopiwa o strukturze w pełni austenicznej. Wiadomo jednak, że spoiny o strukturze w pełni austenicznej cechuje duża skłonność do powstawania gorących pęknięć krystalizacyjnych. Biorąc pod uwagę obydwa wymienione uwarunkowania, firma Metrode zaprojektowała rodzinę materiałów spawalniczych 308LCF i 316LCF o kontrolowanej zawartości ferrytu δ w stopiwie (CF – *Controlled Ferrite*) przeznaczonych specjalnie do zastosowań kriogenicznych.

Metody spawania

Do spawania stali 304L/316L wykorzystuje się praktycznie wszystkie metody spawania łukowego. Metody spawania w osłonie gazowej, zarówno ręczne GTAW, jak i półautomatyczne GMAW, z natury charakteryzują się stosunkowo wysoką czystością metalurgiczną, bardzo niską zawartością tlenu w stopiwie oraz niewielką ilością wtrąceń niemetalicznych, co skutkuje wysokimi wartościami udarności. Metoda GTAW, jak żadna inna metoda spawania łukowego, daje najlepsze możliwości kontroli procesu, jak również jakości złączy spawanych dzięki bardzo wysokiej czystości metalurgicznej. Należy jednak pamiętać o niskiej wydajności metody

GTAW, co niejednokrotnie stanowi znaczne ograniczenie i z tego powodu stosowana jest ona głównie do wykonywania warstw przetopowych, a tylko w niektórych wypadkach również do warstw wypełniających w złączach cienkościennych. Metoda spawania półautomatycznego GMAW drutem pełnym jest metodą zdecydowanie wydajniejszą, niemniej jednak nie znajduje szerokiego zastosowania do spawania tego typu stali. W tabelicy I przedstawiono wyniki badania właściwości mechanicznych i pracy łamania KV, jak również wielkości rozszerzenia poprzecznego LE stopiwa drutów ER316LCF (GTAW) oraz Supermig 316LSi (GMAW).

Spawanie ręczne elektrodami otulonymi (MMA), drutami proszkowymi (FCW) oraz łukiem krytym (SAW) nie gwarantuje tak wysokiego poziomu udarności, jak to ma miejsce w przypadku spawania drutem pełnym w atmosferze gazów osłonowych. Wszystkie wymienione procesy związane są z wytwarzaniem żużła podczas spawania, co niestety skutkuje większą zawartością tlenu w stopiwie, jak również większą ilością odżuźlowych wtrąceń niemetalicznych, które obniżają poziom udarności. W celu zapewnienia dostatecznie wysokiej udarności do zastosowań kriogenicznych w przypadku procesów żuźlowych (MMA, FCW, SAW) należy zwrócić uwagę na trzy zagadnienia:

- udział objętościowy ferrytu w materiale spoiny;
- skład chemiczny stopiwa (stosunek Cr_{eq}/Ni_{eq});
- rodzaj i typ żużła:
 - otuliny w przypadku elektrod,
 - topnik w przypadku łuku krytego,
 - proszek w przypadku drutów rdzeniowych.

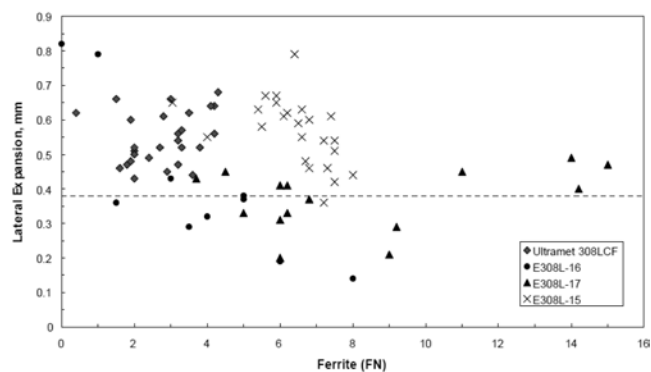
Udział objętościowy ferrytu δ w materiale spoiny

Udział objętościowy ferrytu δ w materiale spoin austenitycznych w zależności od warunków pracy jest ściśle określony. W przypadku przepisów ASME Sec. III [7] minimalna zawartość ferrytu δ w spoinie mierzona

Tabela I. Typowe właściwości mechaniczne stopiwa drutów Metrode ER316LCF oraz Supermig 316LSi

Table I. Representative Mechanical Properties from All-Weld Metal Joints Using Gas Shielded Processes and 316LCF Wire

Metoda spawania	GTAW	GMAW
Materiał dodatkowy	Metrode ER316LCF (ER316L/W 19 12 3 L)	Supermig 316LSi (ER316LSi, W 19 12 3 LSi)
Gaz osłonowy	Ar	Ar+2%O ₂
R _m , MPa	605	559
R _{0,2} , MPa	466	413
Wydłużenie: A ₄ , %	41	50
A ₅ , %	37	47
Przewężenie Z, %	62	73
Temp. -196°C: Praca łamania, J	105	43
LE, mm	1,17	0,58



Rys. 10. Zależność pomiędzy rozszerzeniem poprzecznym LE i udziałem objętościowym ferrytu w spoinie FN (temperatura badania -196°C). Wyniki dla elektrody Metrode Ultramet 308 LCF (CF – Controlled Ferrite) na tle typowych elektrod 308L-16/17

Fig. 10. Lateral Expansion LE vs Ferrite Number FN for 308L SMAW Electrodes at -196°C. Note the Superiority of Ultramet 308LCF, a Specially Designed Rutile Electrode, Compared with Conventional Rutile E308L-16/17 Types.

za pomocą *liczby ferrytowej* FN nie powinna być mniejsza od 5FN. Dla temperatury pracy powyżej 427°C (800°F) te same przepisy wymagają 3÷10FN. Przepisy API 582 [8] wymagają minimum 3FN, chociaż dla zastosowań kriogenicznych może być wymagany niższy udział ferrytu δ . Na podstawie licznych badań zaobserwowano, że niższemu udziałowi ferrytu δ w spoinie odpowiadają wyższe wartości ciągliwości przełomu mierzone za pomocą rozszerzenia poprzecznego LE [9÷11]. Właśnie z tego powodu spełnienie warunku $LE \geq 0,38$ mm wymaga ścisłej kontroli udziału ferrytu δ w spoinie. Zarówno dla elektrod otulonych, jak i drutów proszkowych liczba ferrytowa powinna mieścić się w zakresie 2÷5FN. Zależność pomiędzy plastycznością materiału spoiny określoną za pomocą rozszerzenia poprzecznego LE i liczbą ferrytową FN w przypadku elektrod otulonych pokazano na rysunku 10. Jak widać, niższemu udziałowi ferrytu odpowiadają wyższe udarności. Ścisła kontrola ferrytu δ w zakresie 2÷5FN realizowana jest w grupie produktów Metrode oznaczonych symbolem CF (*Controlled Ferrite*), którym odpowiada plastyczność przełomu stopiwa w zakresie $LE = 0,4 \pm 0,7$ mm.

Kontrola składu chemicznego

W przypadku austenitycznych materiałów spawalniczych o niskim udziale ferrytu δ należy zwrócić uwagę na problem gorących pęknięć krystalizacyjnych i mikropęknięć. W przypadku niższych zawartości ferrytu w zakresie 2÷3FN skłonność ta wyraźnie wzrasta. Z tego powodu większość przepisów określa minimalny udział ferrytu δ w spoinie właśnie w celu zminimalizowania skłonności do występowania pęknięć gorących krystalizacyjnych oraz mikropęknięć.

Sposobem na wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie skłonności do występowania pęknięć krystalizacyjnych jest precyzyjna kontrola składu chemicznego materiału spoiny, w celu uzyskania odpowiedniego

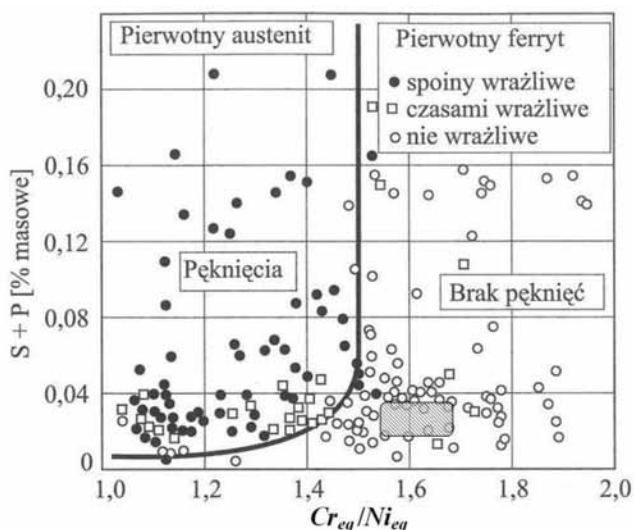
stosunku Cr_{eq}/Ni_{eq} : pierwiastków ferrytotwórczych reprezentowanych przez ekwiwalent chromu Cr_{eq} do pierwiastków austenitotwórczych reprezentowanych przez ekwiwalent niklu Ni_{eq} . W celu określenia pożądanego składu chemicznego, dla którego odporność na pęknięcie krystalizacyjne wyraźnie wzrasta, stosuje się diagram Suutala (rys. 11). Obszar wyraźnie większej odporności na pęknięcia krystalizacyjne leży po prawej stronie linii odpowiadającej wartości współczynnika $(Cr_{eq}/Ni_{eq}) = 1,5$.

W grupie elektrod Ultramet 308LCF i Ultramet 316LCF o kontrolowanym udziale ferrytu δ nie zaobserwowano problemu pęknięć krystalizacyjnych, czy mikropęknięć, co oczywiście wiąże się z odpowiednią kontrolą składu chemicznego – na rysunku 11 obszar zaznaczony prostokątem. Poprzez kontrolę udziału ferrytu w zakresie 2÷5FN oraz równoczesne utrzymywanie współczynnika Cr_{eq}/Ni_{eq} na odpowiednim poziomie w celu wyeliminowania potencjalnego ryzyka pęknięć gorących, skład chemiczny stopiwa elektrod Ultramet 308LCF oraz Ultramet 316LCF utrzymywany jest w bardzo wąskim zakresie. W tabelicy II pokazano skład chemiczny stopiwa przykładowych partii elektrod Ultramet 308LCF oraz Ultramet 316LCF.

Tabela II. Skład chemiczny wybranych partii elektrod Ultramet 308LCF oraz 316LCF

Table II. Deposit Analysis from Representative Batches of Ultramet 308LCF and Ultramet 316LCF

Skład chemiczny elektrod	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	N %	O %
Ultramet 308LCF	0,023	0,77	0,58	0,014	0,022	18,9	9,6	0,04	0,04	0,112	0,064
Ultramet 316LCF	0,021	0,81	0,61	0,012	0,022	17,3	11,4	2,23	0,04	-	-



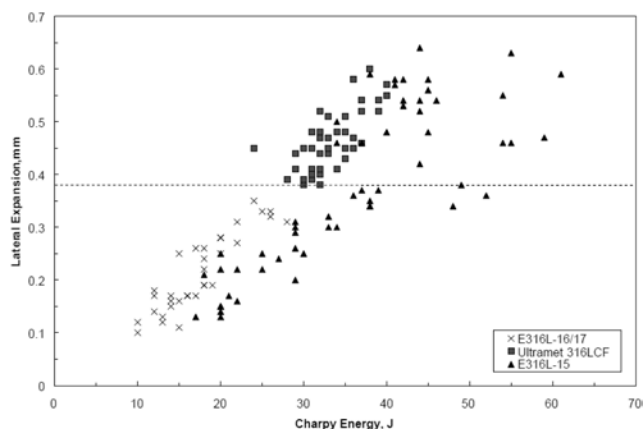
Rys. 11. Diagram Suutala z zaznaczonym obszarem składu chemicznego typowym dla elektrody Metrode Ultramet 308LCF [7]. Obszar odporny na pęknięcia krystalizacyjne znajduje się po prawej stronie linii odpowiadającej $(Cr_{eq}/Ni_{eq}) = 1,5$

Fig. 11. Suutala Diagram [7] with the Ultramet 308LCF SMAW Electrode Composition Range Superimposed. The Ultramet 308LCF Composition Range is Well in the "No Cracking" Region of the Suutala Diagram

Rodzaj otuliny

Dla materiałów niskowęglowych i niskostopowych typu C-Mn powszechnie znana jest reguła, że najlepsze wyniki udarności uzyskuje się, stosując elektrody w otulinie zasadowej typu „B”. Zależność ta nie jest tak oczywista w grupie materiałów austenitycznych Cr-Ni (308), czy Cr-Ni-Mo (316), chociaż wieloletnie doświadczenia wskazują na nieznacznie wyższe poziomy udarności dla elektrod w otulinie zasadowej typu E 3XX-15 w porównaniu do elektrod rutyłowych E3XX-16/17 [9÷11], co zostało przedstawione na rysunku 12. Wyniki wskazują nieznacznie wyższe wartości udarności dla elektrod w otulinie zasadowej E316-15 w porównaniu do elektrod rutyłowych E316-16/17. Z drugiej jednak strony można zaobserwować, że samo zastosowanie elektrod w otulinie zasadowej E316L-15 nie daje gwarancji uzyskania minimalnej plastyczności przełomu stopiwa na poziomie $LE \geq 0,38$ mm.

Zatem w grupie materiałów kriogenicznych nieodzowne jest kontrolowanie zarówno udziału objętościowego ferrytu δ w materiale spoiny, jak również składu chemicznego w celu uzyskania odpowiedniego wskaźnika Cr_{eq}/Ni_{eq} . Rodzaj otuliny nie odgrywa w tym wypadku znaczącej roli. W rodzinie materiałów o kontrolowanym udziale ferrytu CF firma Metrode oferuje zarówno elektrody w otulinie rutyłowej, jak i zasadowej. Najczęściej stosowane elektrody Ultramet 308LCF i 316LCF dzięki rutyłowemu charakterowi otuliny charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami spawalniczymi przy jednoczesnym spełnieniu wymagań w zakresie udarności, co zostało pokazane na rysunku 12. Elektrody zasadowe Ultramet B308LCF (E308L-15) oraz Ultramet B316LCF (E308L-15) wykorzystywane są jedynie do wykonywania najbardziej wymagających złączy w pozycjach wymuszonych. W tabelicy III pokazano typowe właściwości mechaniczne stopiwa elektrod Ultramet 308/316LCF. Dla każdej partii produkowanych elektrod wykonywane są testy udarności Charpy-V w temperaturze $-196^{\circ}C$ z uwzględnieniem kryterium $LE \geq 0,38$ mm.



Rys. 12. Zależność pomiędzy wielkością rozszerzenia poprzecznego LE w temperaturze $-196^{\circ}C$ a rodzajem otuliny elektrod 316L

Fig. 12. All-Weld Metal Impact Properties at $-196^{\circ}C$ for 316L SMAW Electrodes Showing the Effect of Different Coating Types

Wpływ parametrów spawania na udarność stopiwa

W grupie materiałów austenitycznych powszechnie znany jest korzystny wpływ większej energii liniowej spawania (przy mniejszej liczbie ściegów) na poziom udarności złączy spawanych [12÷13], co zostało niezależnie potwierdzone w laboratoriach Metrode przez serię testów przeprowadzonych dla różnych poziomów energii liniowej spawania od 1,0 do 2,7 kJ/mm. Wyniki tych badań zostały zestawione w tablicy IV. Jak dotąd nie rozpoznano przyczyn korzystnego wpływu większej energii liniowej na poziom udarności, niemniej jednak wielu badaczy wiąże to z faktem mniejszych naprężeń powstających w przypadku mniejszej liczby grubszych ściegów. Trzeba wyraźnie zaznaczyć, że przepisy norm europejskich czy amerykańskich nie pozwalają na stosowanie zbyt wysokich energii liniowych do spawania stali austenitycznych elementów urządzeń czy instalacji pracujących w środowisku korozyjnym. Ograniczenie to związane jest z niekorzystnym wpływem

Tablica III. Typowe właściwości mechaniczne stopiwa elektrod Ultramet 308/316 LCF

Table III. Representative Mechanical Properties from All-Weld Metal Joints Using Ul-tramet 308LCF and Ultramet 316LCF

Materiał dodatkowy	Ultramet 308LCF	Ultramet 316LCF
Oznaczenie wg AWS A5.4	E308L-16	E316L-16
Oznaczenie wg EN 1600	E 19 9 LR 32	E 19 12 3 LR 32
R _m , MPa	583	565
R _{0,2} , MPa	452	461
Wydłużenie: A ₄ , %	52,5	51,5
A ₅ , %	47,0	46,5
Przewężenie Z, %	52	63
Temp. -196°C: Praca łamania, J	32	33
LE, mm	0,49	0,46

Tablica IV. Wpływ energii spawania (liczby ściegów) na udarność złącza wykonanego łukiem krytym drutem 316L przy topniku SSB. Grubość blachy 22 mm

Table IV. Effect of Heat Input/Numbers of Runs on Impact Properties of 316L SAW Produced with the Same Batch of Wire and SSB Flux in 22mm Thick Plate

Energia liniowa kJ/mm*	Liczba ściegów	Liczba ferrytowa FN	Udarność w temperaturze -196°C	
			KV, J	LE, mm
1,0	27	5	28	0,30
1,8	17	7	34	0,42
2,7	10	7	46	0,48

* Stałe parametry prądowo-napięciowe I = 300 A, U = 30 V przy zmiennej prędkości spawania.

wysokiej energii spawania na późniejsze właściwości korozyjne złączy spawanych.

Skroplony gaz ziemny nie wykazuje praktycznie właściwości korozyjnych, dlatego w przypadku aplikacji LNG nie obserwuje się negatywnego wpływu wysokiej energii spawania (na poziomie ok. 2,5 kJ/mm) na właściwości korozyjne złączy. Dlatego stosowanie wyższych energii spawania do tego rodzaju aplikacji jest dopuszczalne. Oczywiście dobór parametrów, tym samym energii liniowej spawania, powinien być uzależniony od rodzaju i grubości spawanego złącza. Testy prowadzone przez niektórych badaczy potwierdzają brak niekorzystnego wpływu na właściwości mechaniczne złączy spawanych przy zastosowaniu znacznych energii liniowych do 2,9 kJ/mm oraz przy stosunkowo wysokiej temperaturze międzyściegowej, sięgającej nawet do 300°C [14].

Korzystny wpływ wyższej energii liniowej może być również wykorzystywany w przypadku spawania ręcznego elektrodami otulonymi. Zastosowanie większych średnic elektrod i tym samym większych prądów i energii spawania skutkuje lepszą udarnością spoin. Poza tym zastosowanie większych średnic, obok korzyści związanych z poziomem udarności, dzięki większej wydajności pozwala na skrócenie czasu spawania złącza.

Podsumowanie

Próba udarności Charpy'ego przez mierzoną wielkość pracy łamania KV (KU) obrazuje zdolność materiałów konstrukcyjnych i złączy spawanych do absorpcji energii dynamicznej w obecności karbów zewnętrznych oraz przez ocenę udziału przełomu plastycznego na przekroju złamanej próbki SFA (*Shear Fracture Area*) i wielkość rozszerzenia poprzecznego LE (*Lateral Expansion*) zdolność samohamowania powstałych pęknięć. Niedawno opublikowana norma EN ISO 148 formalizuje stosowanie wskaźników SFA i LE również na obszarze Europy. Wskaźnik rozszerzenia poprzecznego LE jest użytecznym miernikiem ciągliwości przełomu w materiałach, w których sama ocena SFA nie jest wystarczająca i dokładna,

np. w stalach austenitycznych i dupleks. Zaprojektowana przez Metrode rodzina austenitycznych materiałów spawalniczych o kontrolowanym udziale ferrytu δ w spoinie typu 308LCF i 316LCF, przeznaczona do zastosowań kriogenicznych, spełnia w temperaturze -196°C i wyższych wymagania ASME dotyczące wielkości KV oraz LE gwarantujących odporność na pękanie w warunkach obciążeń dynamicznych. W przypadku eksploatacji złączy spawanych w mediach niekorozyjnych dopuszczalne jest spawanie materiałów austenitycznych z zastosowaniem wysokiej wartości energii liniowej spawania, wpływającej w tych materiałach na wzrost plastyczności złączy spawanych.

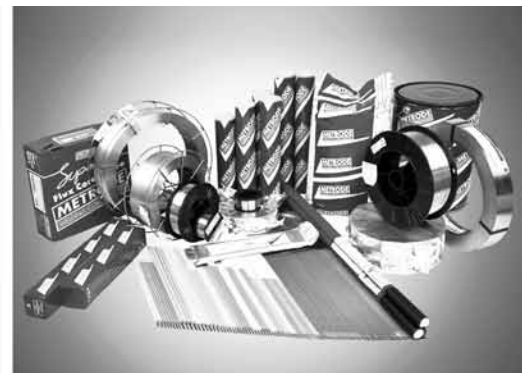
Literatura

- [1] Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom 1 – Spawalność stali, Kraków, 2009.
- [2] Tasak E.: Spawalność stali, Wyd. Fotobit, Kraków 2002.
- [3] Stankiewicz M., Ziółkowski E.: Porównanie wyników badań udarności stali konstrukcyjnych określonych w oparciu o normy PN EN 10045-1 i ASTM E23, Dozór Techniczny, Nr 3/1997.
- [4] Manahan M. Jr., McCowan C.N., Manahan M.P. Sr.: Percent Area Determination in Charpy Impact Testing, Journal of ASTM International, January, 2008.
- [5] Wiesner C.S.: Toughness requirements for duplex and super duplex stainless steels, Duplex Stainless Steels, 97, Proceedings of the 5th World Conference, Maastricht, The Netherlands, 21-23 October 1997, Book 2, p. 979-990, Zutphen, KCI Publishing, 1997.
- [6] Honeycombe J., Barlow J. A., Gooch T.G.: Welding austenitic steel and high completion rate processes: submerged arc welding, TWI Research Report 155/1981, August, 1981.
- [7] ASME III, Division 1, Subsection NB „Rules for construction of nuclear power plant components”, Paragraph NB-2433.2.
- [8] API Recommended Practice 582 „Welding guidelines for the chemical, oil and gas industries” 1st edition, March 2001.
- [9] Siewart T. A.: Predicting the toughness of SMA austenitic stainless steel welds at 77K, Welding Journal, March 1986, s. 23-28.
- [10] Szumachowski E.R. & Reid H.F. : Cryogenic Toughness of SMA austenitic stainless steel weld metal: Part I, Role of ferrite, Welding Journal 58 (11), Nov. 1978, Research Supplement, s. 325-333.
- [11] Szumachowski E.R. & Reid H.F. : Cryogenic toughness of SMA austenitic stainless steel weld metal: Part II, Role of nitrogen”, Welding Journal, 58 (2), Feb. 1979, Research Supplement, s. 34-44.
- [12] Karlsson L. et al.: Low temperature properties of weld metals for cryogenic applications, International Conference on Application of Stainless Steel, 9-11th June 1992, Stockholm.
- [13] Gowrisakar I. et al.: Effect of number of passes on the structure and properties of submerged arc welds of AISI type 316L stainless steel, Welding Journal, 1987, May, s. 147-154s.
- [14] Ginn B.J. & Davet T.G.: Effects of interpass temperature when welding austenitic stainless steel, Met. Construction, 1983, Dec., s. 745-752.
- [15] EN 10045 Metallic materials – Charpy impact test.
- [16] ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.
- [17] EN ISO 148 Metallic materials – Charpy pendulum impact test.



Platformy wiertnicze Offshore

METRODE STOPOWE MATERIAŁY SPAWALNICZE



Metrode Products Ltd
Hanworth Lane, Chertsey
Surrey KT16 9LL UK
sales@metrode.com

PRZEDSTAWICIEL W POLSCE
Benedykt Ślázak
tel. 603 876 882
benedykt.slazak@metrode.com

METRODE
WELDING CONSUMABLES
A Lincoln Electric Company

NASI DYSTRYBUTORZY

LINCOLN Sp. J. – Sosnowiec
tel. +48 32 266 87 87
www.lincoln.com.pl

FIGEL Sp. z o.o. – Gdańsk
tel. +48 58 34 00 678
www.figel.pl



Terminale LNG, instalacje kriogeniczne

www.metrode.com



Energetyka, przemysł petrochemiczny