E. Ranatowski

University of Technology and Life Science, Faculty of Mechanical Engineering,
Mechanical Department, 85- 763 Bydgoszcz, Poland

UŻYTECZNOŚĆ OBLICZENIOWEJ MECHANIKI SPAWANIA W PROCESIE KSZTAŁTOWANIA TECHNOLOGII

STRESZCZENIE

Bazując na Obliczeniowej Mechanice Spawania (OMS) scharakteryzowano wzajemne oddziaływanie cieplno-mechaniczne w procesie spawania. Celem OMS jest rozszerzenie możliwości analizy: temperatury, naprężeń i odkształceń razem z ewolucją mikrostruktury w procesie spawania. W dalszej kolejności określono aktualny stan relacji pomiędzy modułami: cieplnym, mikrostrukturą i mechanicznym. Pozwoliło to ustalić metodykę badań spawalności materiałów i konstrukcji, opartą o metodę obliczeniową.

Słowa kluczowe: spawalność, OMS, stale, modelowanie matematyczne, mechanika pękania.

WSTĘP

Rozwój spawalnictwa jako techniki wytwarzania, który obserwujemy w ostatnich latach wyraża się w sposób praktyczny w budowie nowych jakościowo konstrukcji, charakteryzujących się wysoką niezawodnością, np.:

- gigantycznych spawanych platform wiertniczych, pracujących w bardzo trudnych warunkach Morza Północnego,
- konstrukcji spawanych mających zastosowanie w energetyce jądrowej, przemyśle kosmicznym, transporcie morskim i lądowym itp.

Postęp ten jest, między innymi, wynikiem:

- opracowania i wdrożenia do praktyki przemysłowej stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości oraz innych materiałów o specjalnych właściwościach fizycznych oraz mechanicznych, połączony z równoczesnym rozpracowaniem złożonych zagadnień ich spawalności,
- rozwoju metod spawania opartych o wysokoskoncentrowane źródła ciepła np. strumień plazmy, laser, wiązka elektronów oraz mechanizacji i automatyzacji procesu spawania aż do jego robotyzacji,
- opracowania podstaw fizycznych procesu spawania.

Należy jednakże stwierdzić, iż pomimo niewątpliwych osiągnięć w zakresie rozwoju spawalnictwa i jego zastosowania w technice nie udało się doprowadzić do takiego postępu, aby stosowanie spawania było prostsze a liczba problemów do rozwiązania wcale nie zmalała. Jednym z takich problemów jest fundamentalny, dla właściwego

opracowania technologii spawania, problem oceny spawalności, stanowiący punkt wyjścia dla opracowania technologii spawania. Aktualnie spawalnictwo uważane jest jako proces technologiczny o charakterze specjalnym, którego rezultaty nie mogą być sprawdzone w całkowitym stopniu w następstwie kontroli lub testów produkcyjnych. Powyższe stwierdzenie jest zgodne m.in. z koncepcją „Niemieckiego Ministerstwa Nauki i Technologii”, iż około 75% wad przyszłej produkcji powstaje na etapie konstruowania i technologicznego opracowania produkcji. W związku z tym systemy zapewnienia jakości produkcji są ukierunkowane na rozwój nowoczesnych metod projektowania konstrukcji oraz technologii ich wytwarzania. Praktycznie, zgodnie m.in. z EN 729, działania inżynierskie ukierunkowane są z jednej strony na próby praktyczne spawania a z drugiej – teoretycznej – opierają się na systemach ekspertowych, bazujących na komputerowych symulacjach fizycznych procesów.

Reasumując, jednym z istotnych osiągnięć współczesnej myśli technicznej jest pogłębiona wiedza inżynierska o przebiegu procesów technologicznych, wyrażona przez „Obliczeniową Mechanikę Spawania” [1].

OBLICZENIOWA MECHANIKA SPAWANIA – UWAGI OGÓLNE

Celem „Obliczeniowej Mechaniki Spawania” (OMS) jest rozszerzenie możliwości analizy: temperatury, naprężeń i odkształceń razem z ewolucją mikrostruktury w procesie spawania. Zniekształcenie spowodowane przez objętościowe natężenie materiału w wyniku termicznej ekspansji oraz fazowej transformacji, generują dominujące obciążenie w procesie analizy naprężeń.

W zawężonym sensie OMS obejmuje więc relację złożoną, o sprzężeniu zwrotnym, co w sensie fizycznym prowadzi do ustalenia związku pomiędzy modułami: polem termicznym (PT) – ewolucją mikrostruktury (EM) – polem mechanicznym (PM) o wzajemnym oddziaływaniu synergicznym. Ocena wzajemnych relacji pomiędzy ww. modułami powinna więc polegać na analizie wymiarowej powyższych modułów PT-PM-EM, przy ścisłym zapisie fizykalnym zachodzących w nich procesów. Występuje tu również wyraźna asymetria pomiędzy (PT), (PM) a (EM). W szerszym kontekście OSM obejmuje także elementy komputerowego wspomaganie procesu konstruowania (CAD) oraz wytwarzania (CAM). Moduły (PT), (PM) oraz (EM) stanowią podstawy do budowy algorytmów stosowanych w rozwiązywaniu teoretycznym praktycznych zagadnień inżynierskich z zakresu spawalnictwa.

Scharakteryzujemy więc aktualnie stosowaną metodykę badawczą w formie schematu blokowego obliczeń mikrostruktury i właściwości spoiny (SP) oraz strefy wpływu ciepła (SWC) – Rys.1 [2]. Cechą charakterystyczną połączeń spawanych, zwłaszcza spoiny, jest wysoki stopień zróżnicowania składu chemicznego, struktury oraz wynikających z tego cech mechanicznych i fizycznych. Prowadzi to w ostatecznym rezultacie, po uwzględnieniu procedury przedstawionej na Rys.1, do oceny stopnia uwrażliwienia (SU) materiału hutniczego na proces spawania i oceny jego spawalności. Należy w tym miejscu podkreślić znaczący rozwój metalurgii i fizyki procesu spawania obejmujący m.in. hydrodynamikę jeziora spawalniczego z uwzględnieniem sił powierzchniowych i objętościowych różnego pochodzenia a także modelowania procesu krystalizacji SP i morfologii przemian strukturalnych w SWC.

Rys. 1. Schemat obliczeń mikrostruktury oraz właściwości SP i SWC, gdzie:

$\varepsilon, \varepsilon^e, \varepsilon^p,$ - są odpowiednio odkształceniem całkowitym, sprężystym, plastycznym, termicznym
 $\varepsilon^T, \varepsilon^c, \varepsilon^{ph}$ i spowodowanym pełzaniem oraz przemianami fazowymi

Do oceny SU materiału praktycznie używa się stosować normalizowane parametry mechaniki pękania np. K_{Ith}/K_{IC} w warunkach pękania zimnego lub w warunkach eksploatacyjnych δ/δ_c lub J/J_c [2]. Wobec tego:

$$SU_1 = K_{Ith} / K_{IC} \quad (1a)$$

$$SU_2 = \delta / \delta_c \neq J / J_c \quad (1b)$$

$$SU_1 \neq SU_2 \quad (1c)$$

Z powyższego wynika więc, iż nie istnieje jeden parametr w sposób globalny określający stopień uwrażliwienia na proces spawania, co niewątpliwie komplikuje ocenę spawalności materiałów hutniczych na etapie ich wytwarzania oraz w procesie spawania. Należy stwierdzić, iż cechy mechaniczne kształtują się już na etapie

początkowym krystalizacji spoiny. Na Rys. 2 przedstawiono rozwój mikrostruktury spoiny w procesie spawania stali niskowęglowej [3]. Znajomość przebiegu procesów termodynamicznych w czasie powstania złącza spawanego i wiążących parametry ekstensywne z doбором intensywnych, wskazują na możliwość aktywnego modelowania i sterowania procesem spawania.

Rys. 2. Schemat transformacji mikrostruktury spoiny ze stali niskostopowej przy chłodzeniu ciągłym [2]:

I-formacja wtrąceń, II-krystalizacja cieczy w ferryt δ , III-całkowita austenitacja, IV-zarodkowanie ferrytu początkowego α (allotriomorphic ferrite), V-wzrost ferrytu początkowego wokół granicy ziarna austenitu, VI-formacja ferrytu Widmanstättena α_w , VII-formacja ferrytu iglastego α_a (accicular ferrite)

W czasie chłodzenia jeziora spawalniczego, w zakresie temperatur $2300 \div 800^\circ\text{K}$, rozpuszczony tlen oraz odtleniacze reagują w cieczy jeziora, tworząc złożone wtrącenia tlenkowe o wymiarach od $0,1$ do $1 \mu\text{m}$. W zakresie temperatur $1800 \div 1600^\circ\text{K}$ krystalizacja cieczy w ferryt δ rozpoczyna się i rozwija się od wtrąceń tlenkowych. Po całkowitej transformacji ferrytu δ w austenit γ w zakresie temperatur $1100 \div 500^\circ\text{K}$ następuje transformacja austenitu γ w różne postaci ferrytu: początkowego, Widmanstättena i iglastego. Zasadniczo, do tej pory, nie ma kompleksowego modelu, który pozwalałby ująć wszystkie procesy w jednolitą teorię. Proces modelowania struktury spoiny wymaga więc przyjęcia makroskopowej skali opisu fizycznego transportu ciepła i przepływu płynu oraz mikroskopowej skali zarodkowania ziaren i ich rozrostu. Reasumując, aktualnie stosowane metody są używane do teoretycznej i numerycznej symulacji oraz modelowania mikrostruktury, bazują głównie na:

- termodynamicznej metodzie opisu przemian fazowych,
- termomechanicznej symulacji mechanizmu transformacji fazowych,
- kinetycznej metodzie oceny przemian fazowych – analitycznej i numerycznej,
- transporcie ciepła i masy.

CECHY MECHANICZNE SPOINY PM JAKO REZULTAT PT I EM NA PRZYKŁADZIE WZROSTU PĘKNIĘCIA

Z zestawienia przedstawionego na Rys.1 wynika, że ocena termiczna procesu spawania sprzężona jest z metalurgiczną transformacją – od formacji wtrąceń do kształtowania mikrostruktury, ale o charakterze heterogenicznym – Rys.2. W zależności od natury procesu spawania trudno jest zapewnić jakość indywidualnych połączeń spawanych. Zasadniczo połączenia spawane zawierają więcej wad, aniżeli otaczający materiał rodzimy. Jest to jeden z ważniejszych problemów technologicznych w celu uzyskania optymalizacji: kosztu, wytrzymałości i odporności na pękanie złączy spawanych i poprawnej oceny spawalności. Aktualnie uznaje się, iż w stadium początkowym mikroskopowy mechanizm pękania w złączu spawanym jest powiązany z formacją nieciągłości w postaci jam (dziur), ich wzrostem i wzajemnym łączeniu. Zakłada się również, iż jamy powstają przy wtrąceniach i są cylindryczne. W połączeniach spawanych rolę tę pełnią głównie tlenki, siarczki oraz węgliki. Naprężenia w sąsiedztwie nieciągłości możemy określić ze związku [4]:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi(r+\delta)} + \sqrt{\pi r}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 - (v^2 / c_d^2) \sin^2 \Theta} + \cos \Theta}{1 - (v^2 / c_d^2) \sin^2 \Theta}} \quad (2)$$

gdzie: K- współczynnik intensywności naprężenia, v - prędkość wierzchołka pęknięcia, c_d - prędkość propagacji bezwirowych fal, r, Θ - współrzędne biegunowe z początkiem usytuowanym w wierzchołku pęknięcia,

oraz:

$$\delta = \frac{\kappa K^2}{\sigma_o^2} \quad (3)$$

jest wprowadzone do (2) w celu usunięcia osobliwości. Na przykład, jeżeli $\kappa = 0,025$, to [4]:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_o}{\sqrt{0,025 \pi}} = 3,6 \sigma_o \quad (4)$$

Wzrost promienia cylindrycznego otworu „a” następuje zgodnie z zależnością:

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \beta \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} - 1 \right)^n; \quad \sigma > \sigma_o \quad (5)$$

gdzie: a - promień cylindrycznego otworu, t - czas, β - stała (parametr płynności),
 σ_o - stałe naprężenie.

Otworki tworzą się przy cząsteczkach „i” gdy naprężenia wzrastają ponad pewną krytyczną wartość σ_{el} , która zależy od wymiaru cząsteczki:

$$\sigma_{el}^{(i)} = \text{sof } \sigma_o \left[1 + \left(\frac{b_o}{a_i} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

gdzie: a_i - promień cząsteczki, b_o - standardowa wartość promienia cząsteczki, sof - współczynnik charakteryzujący kombinację osnowy cząsteczek.

Równania (2)÷(6) stanowią matematyczną charakterystykę modelu, ilustrującego mikroskopowy proces wyężenia materiału w pobliżu wierzchołka pęknięcia [4] z uwzględnieniem cząsteczek – wtrąceń niemetalicznych. Problem ten nieco inaczej określono bazując na modelu makroskopowym, określonym w opracowaniach [2] i [5]. W obydwu przypadkach uwzględniono wpływ heterogeniczności biorąc pod uwagę parametry charakteryzujące wpływ więzów mechanicznych w procesie oceny odporności na pękanie, opartym o klasyczne rozwiązania mechaniki pęknięcia.

Dla przykładu, dla płyt podczas jedno- lub dwuosiowego rozciągania, dokonano oceny parametrów charakteryzujących wpływ więzów mechanicznych jako [5]:

$$Q = (\sigma_{\Theta\Theta} - \sigma_{\Theta\Theta}^{ssy}) / \sigma_y \quad (7)$$

$$Q_m = (\sigma_h - \sigma_h^{ssy}) / \sigma_y \quad (8)$$

$$H = \sigma_h / \sigma_e - (\sigma_h / \sigma_e)^{ssy} = h - h^{ssy} \quad (9)$$

gdzie: Q , Q_m , H – parametry definiujące więzy mechaniczne, $\sigma_{\Theta\Theta}$ - naprężenie rozwarcia szczeliny, σ_h - naprężenie hydrostatyczne, σ_e - efektywne naprężenie Hubera-Misesa, σ_y - granica plastyczności.

Użyte oznaczenie ssy wskazuje sąsiedztwo wierzchołka pęknięcia z najwyższą wartością więzów mechanicznych. Wszystkie wielkości w równaniach (7)÷(9) są określone z odległości $r/(J/\sigma_y) = 2$ od wierzchołka pęknięcia w cylindrycznym układzie współrzędnych (r, Θ) .

W oparciu o proces modelowania: analityczny i numeryczny, zgodnie z ustaleniami Burstow’a [6], na Rys.3 przedstawiono - dla 3-punktowego zginania - wpływ więzów mechanicznych jako rezultatu lokalnego zróżnicowania struktury w układzie normalizowanych parametrów.

Rys. 3. Naprężenia przed frontem pęknięcia

W praktyce oznacza to istotny wpływ na pękanie połączeń spawanych, co decyduje m.in. o spawalności materiałów i konstrukcji.

WNIOSKI

Istotnym osiągnięciem współczesnej myśli technicznej w zakresie inżynierii spawania jest pogłębiona wiedza inżynierska, wyrażona m.in. przez „Obliczeniową Mechanikę Spawania” (OMS). W pierwszej kolejności, w ramach syntezy OMS, przedyskutowano schemat obliczeń mikrostruktury oraz właściwości SP i SWC oraz transformacji spoiny ze stali niskostopowej przy chłodzeniu ciągłym. Problem ten uwzględniono przy ocenie cech mechanicznych spoiny, na przykładzie wzrostu pęknięcia na poziomie mikroskopowym, z uwzględnieniem formacji nieciągłości w spoinie, charakteryzując również model makroskopowy. Powyższa analiza wskazuje na dużą użyteczność praktyczną OMS w procesie opracowania dokumentacji technicznej do realizacji zadań w budowie współczesnych konstrukcji.

LITERATURA

1. Goldak J.A., Akhlaghi M.: Computational Welding Mechanics. Springer. ISBN-13: 978-0387-23287-4. springeronline.com.
2. Ranatowski E.: The influence of the constraint effect on the mechanical properties and Weldability of the Mismatched Weld Joints. Mathematical Modelling of Weld

- Phenomena 8. Edited by H. Cerjak, H. Badeshia, E. Kozeschnik. TU Graz. 2007 (425÷441).
3. David S.A., Babu S.S., *Microstructure modelling in weld metal*. Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3. Edited by H. Cerjak. The Institute of Materials. London. 1997 (151÷180).
4. Broberg K.B.: Computer demonstration of crack growth. International Journal of Fracture. 42 (1990) 277÷285.
5. Ainsworth R.A. et al., Methods for including constraint effects within the SINTAP procedures. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 67, Issue 6 (2000) 563÷571.
6. Burstow M.C.: Analysis of welded joints. SIRIUS. 1996.