

Politechnika Częstochowska

Jerzy Nawrocki

Jacek Słania

Kwiryn Wojsyk

Grzegorz Golański

**Zarys wykorzystania
symulacji MES
w analizie oddziaływania
niezgodności spawalniczych
na cechy eksploatacyjne
konstrukcji spawanych**

Częstochowa 2020



Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki



KATEDRA TECHNOLOGII
I AUTOMATYZACJI

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

Jerzy Nawrocki, Jacek Słania, Kwiryn Wojsyk
Grzegorz Golański

**Zarys wykorzystania symulacji MES
w analizie oddziaływania niezgodności spawalniczych
na cechy eksploatacyjne konstrukcji spawanych**



Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

CZĘSTOCHOWA 2020

Recenzenci:

dr hab. inż. Dariusz Golański prof. uczelni
(Politechnika Warszawska)

dr hab. inż. Jacek Górka prof. uczelni
(Politechnika Śląska)

Redakcja
Lucyna Żyła

Redakcja techniczna
Robert Świerczewski

Projekt okładki
Dorota Boratyńska

ISBN 978-83-7193-756-9
e-ISBN 978-83-7193-757-6

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej
Częstochowa 2020

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	6
1. WSTĘP	9
2. NIEZGODNOŚCI SPAWALNICZE I ICH WPŁYW NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZŁĄCZY SPAWANYCH	11
3. WPROWADZENIE DO METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH	16
3.1. ZASADY DYSKRETYZACJI	18
3.1.1. <i>Warunki brzegowe</i>	20
3.1.2. <i>Zasady doboru elementu skończonego</i>	21
3.2. KONCENTRACJA NAPRĘŻENIA	23
3.3. OSOBLIWOŚCI NAPRĘŻENIA A ZASADA DE SAINT-VENANTA	25
3.4. PODSTAWOWE RÓWNANIA ROZWIĄZYWANE W SYMULACJI	26
3.5. PRZYKŁAD UŻYCIA MES W OBLICZENIACH STATYCZNYCH	31
3.5.1. <i>Podział obiektu na elementy skończone</i>	32
3.5.2. <i>Ogólny opis metody rozwiązania</i>	32
3.5.3. <i>Budowa równań dla pojedynczego elementu</i>	33
3.5.4. <i>Połączenie elementów skończonych i równań w obiekt wejściowy</i>	34
3.5.5. <i>Zastosowanie obciążeń oraz warunków brzegowych</i>	35
3.5.6. <i>Rozwiązanie układu równań – przykład</i>	35
4. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU LITERATURY DOTYCZĄCEJ OMAWIANEGO ZAGADNIENIA	39
5. CEL I ZAKRES OPRACOWANIA	43
6. METODYKA BADAŃ	44
6.1. WALIDACJA SYMULACJI	44
6.2. KOMBINACJE OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH	49
6.3. KOMBINACJE OBCIĄŻEŃ ZMĘCZENIOWYCH	49
6.4. ELEMENTY MECHANIKI PĘKANIA	51
6.5. WERYFIKACJA PROGRAMU ZA POMOCĄ ROZWIĄZANIA ZAGADNIENIA PĘKANIA	54
7. BADANIE ZŁĄCZY	57
7.1. STATYCZNA PRÓBA ROZCIĄGANIA MATERIAŁU RODZIMEGO I DODATKOWEGO	57
7.2. WYKONANIE SPAWANYCH ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z NIEZGODNOŚCIAMI	58

7.3. STATYCZNA PRÓBA ROZCIĄGANIA ZŁĄCZY SPAWANYCH	60
7.4. METALOGRAFICZNE BADANIA MIKROSKOPOWE	62
7.5. METALOGRAFICZNE BADANIA MAKROSKOPOWE	66
8. SYMULACJE	68
8.1. ODWZOROWANIE SWC SPOINY W SYMULACJACH MES	68
8.2. SYMULACJA NIEZGODNOŚCI GRUPY 100 – PĘKNIĘCIA	70
8.2.1. <i>Badanie istnienia osobliwości naprężenia</i>	71
8.2.2. <i>Omówienie wyników symulacji</i>	72
8.2.3. <i>Zastosowanie mechaniki pękania w ocenie niezgodności</i>	74
8.2.4. <i>Współczynnik K_1 w niezgodności typu pęknięcia</i>	76
8.2.5. <i>Analiza zmęczeniowa niezgodności nr 1014 i nr 617</i>	77
8.2.6. <i>Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej</i>	78
8.2.7. <i>Koncepcja wady równoważnej w aspekcie niezgodności nr 1014</i>	79
8.2.8. <i>Ocena zapisów normy Eurokod EN 1993 w świetle symulacji</i>	81
8.3. SYMULACJA NIEZGODNOŚCI NR 2011 – POROWATOŚĆ	82
8.3.1. <i>Badanie istnienia osobliwości naprężenia</i>	83
8.3.2. <i>Omówienie wyników symulacji</i>	84
8.3.3. <i>Zastosowanie mechaniki pękania w ocenie niezgodności nr 2011</i>	89
8.3.4. <i>Symulacje zmęczeniowe w ocenie niezgodności nr 2011</i>	90
8.4. SYMULACJA NIEZGODNOŚCI NR 2013 – GRUPA POROWATOŚCI	92
8.5. SYMULACJA NIEZGODNOŚCI NR 4011 – PRZYKLEJENIE	94
8.5.1. <i>Badanie istnienia osobliwości naprężenia</i>	95
8.5.2. <i>Omówienie wyników symulacji</i>	96
8.5.3. <i>Wyznaczenie współczynników K_1 niezgodności nr 4011</i>	98
8.5.4. <i>Analiza zmęczeniowa niezgodności nr 4011</i>	99
8.6. SYMULACJA NIEZGODNOŚCI NR 4021 – BRAK PRZETOPU	99
8.6.1. <i>Badanie istnienia osobliwości naprężenia</i>	100
8.6.2. <i>Omówienie wyników symulacji</i>	101
8.6.3. <i>Analiza zmęczeniowa</i>	102
8.7. ANALIZA WPLYWU NIEZGODNOŚCI NA CZĘSTOTLIWOŚĆ DRGAŃ WŁASNYCH	103
9. DYSKUSJA WYNIKÓW	107
10. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE SYMULACJI	110
10.1. PRZYPADEK NR 1 – ANALIZA NIEZGODNOŚCI NR 507	110
10.1.1. <i>Symulacja naprężenia w złączu</i>	111
10.1.2. <i>Wyniki symulacji</i>	112
10.2. PRZYPADEK NR 2 – ANALIZA PĘKNIĘCIA ZŁĄCZA	112
10.2.1. <i>Symulacja MES złącza</i>	115
10.2.2. <i>Kombinacja obciążenia</i>	115

10.2.3. Wyniki symulacji	117
10.2.4. Wnioski	117
10.3. PRZYPADEK NR 3 – UTRATA ZAPASU BEZPIECZEŃSTWA ŚCIANY SZCZELNEJ WSKUTEK OBECNOŚCI NIEZGODNOŚCI SPAWALNICZYCH	121
10.3.1. Badania mikroskopowe	122
10.3.2. Symulacja MES	125
11. ZAKOŃCZENIE	129
LITERATURA	130
STRESZCZENIE	138
ABSTRACT	140

1. WSTĘP

Niezgodności spawalnicze występują zawsze w złączach spawanych i obniżając ich wytrzymałość, decydują o bezpieczeństwie użytkowania konstrukcji. Obowiązujące w tym zakresie normy PN-EN ISO 6520 [1] i API 577 [2] zawierają zestawienia niezgodności, natomiast normy PN-EN ISO 5817 [3] i API 1104 [4] precyzują ich dopuszczalne wielkości w zależności od wymaganego poziomu jakości złączy stalowych. Ze względu na konieczne uproszczenia nie odnoszą się jednak do ważnych dodatkowych czynników, takich jak kombinacje obciążeń czy lokalizacje niezgodności w złączu oraz nie poruszają problemów wynikających z mechaniki pękania. Kryterium akceptacji uważa się za spełnione, gdy niezgodność kształtuje się poniżej dopuszczalnych wielkości, ale nie zależy ono od przyjętych kombinacji i wartości obciążeń. Ważne wydaje się zbadanie, czy istnieją dodatkowe zmienne pomijane w normach podających poziomy jakości spoin, które w pewnych warunkach stają się istotne. Ma to szczególne znaczenie w najbardziej odpowiedzialnych konstrukcjach inżynierskich, w których awaria jednej spoiny bywa niezwykle kosztowna [5].

Niezgodności spawalnicze powodują znaczne zwiększenie naprężeń lokalnych. W normach stosowanych do obliczeń wytrzymałościowych, dotyczących na przykład rurociągów, zjawisko to nie jest bezpośrednio ujęte. Jedyne stosowane podejście jest używanie kilkunastoprocentowych współczynników bezpieczeństwa, zależnych między innymi od typu spoiny. Zakładanie na etapie projektowania wymaganego poziomu jakości spoin także nie odpowiada współczesnym wymogom bezpieczeństwa, ponieważ służy jedynie do kontroli jakości procesu spawalniczego. W normach stosowanych do projektowania nie ujęto związku pomiędzy poziomem jakości spoiny a zalecanym współczynnikiem bezpieczeństwa. Obecnie, mając do dyspozycji symulacje MES, możliwa jest analiza wartości naprężenia lokalnego. Główną przyczyną braku możliwości przeprowadzenia powtarzalnych eksperymentów na złączach spawanych jest brak możliwości wykonania niezgodności spawalniczych w powtarzalny sposób. Ponadto odwzorowanie kształtu i lokalizacji niezgodności w złączu metodami bezpośrednimi – tensometryczną lub interferencji optycznej – nie jest możliwe w przypadku niezgodności zlokalizowanych wewnątrz złączy. W związku z tym jedynym realnym sposobem badań tych niezgodności jest modelowanie ich kształtu, a następnie badanie ich za pomocą symulacji. Na obecnym etapie technik komputerowych zarówno zbudowanie modelu złączy spawanych z różnymi kombinacjami niezgodności i dowolnymi kombinacjami obciążeń, jak i sporządzenie cyfrowego modelu materiału nie stanowi już większego problemu [6].

Podstawowym celem pracy jest zbadanie i przedstawienie wpływu dodatkowych czynników na rozkład pola naprężenia w złączu spawanym zawierającym

różnego typu niezgodności. Do realizacji tego zadania użyto programów modelujących skomplikowane kształty przestrzenne oraz algorytmów symulacyjnych pracujących w oparciu o metodę elementów skończonych (MES). Wybór tej metody wynika z faktu, że w ciągu ostatniej dekady miał miejsce znaczący rozwój zarówno możliwości obliczeniowych komputerów, jak i jakości komercyjnych programów symulacyjnych pracujących w oparciu o tę metodę. Doprowadziło to nie tylko do bardzo efektywnego i szybkiego rozwoju analizy elementów bryłowych o złożonych kształtach i rozbudowanej kombinacji obciążeń, lecz również do pojawienia się nowych dziedzin jej implementacji.

11. ZAKOŃCZENIE

Wykonane symulacje pokazały, że istnieją dodatkowe zaburzenia pola naprężenia generowane przez niezgodności. Nie uwzględniono w nich naprężeń resztkowych, własnych, spawalniczych pozostałych po procesie spawania. Praktyka dowodzi, że poziom naprężeń własnych może zbliżyć się do granicy plastyczności. W związku z tym wskazane byłoby wykonanie symulacji złączy spawanych, w których uwzględnione byłoby pole naprężenia powstałe od interferencji naprężeń spawalniczych oraz generowanych przez niezgodności.

Zakres wykonanych symulacji dotyczył obciążeń statycznych w środowisku o stałej temperaturze. Z uwagi na to, że złącza spawane z dopuszczalnym poziomem niezgodności w poziomie jakości B pracują w warunkach znaczących zmian temperatury, wydaje się, że kolejnym krokiem może być symulacja ich pracy w tych właśnie warunkach.

Następną grupą problemów, które można ująć w dalszych badaniach, są reakcje złączy z niezgodnością na szybkie zmiany obciążenia. Miałoby to szczególnie duże znaczenie przy budowie elementów elektrowni atomowych, w których reżim obliczeniowy należy do najbardziej wymagających.

Interesujące wydają się badania nad odwzorowaniem zjawisk zachodzących w strefach wpływu ciepła złączy spawanych. Dotyczy to szczególnie zjawisk utwardzania się w tych obszarach.

Symulacje w czytelny, graficzny sposób potwierdziły ogólnie znany fakt, że niezgodności okrągłe, takie jak pęcherze, są znacznie mniej niebezpieczne niż mające ostre krawędzie pęknięcia, przyklejenia czy braki przetopu. Należy jednak przeprowadzić dodatkowe analizy uwzględniające przeważnie bardzo duże ciśnienia gazów wewnątrz pęcherzy, co może dać wgląd w mechanizm zjawiska pęknięcia kruchej spowodowanego tzw. chorobą wodorową.

Wykonanie systematycznych i pogłębionych analiz statycznych i zmęczeniowych na próbkach ze sztucznie wywołanymi niezgodnościami wraz z symulacjami MES dałoby nowy wgląd w przebieg zjawisk zachodzących podczas eksploatacji złączy i spoin różnego typu oraz mogłoby stać się podstawą nowych unormowań w zakresie projektowania i wymiarowania konstrukcji spawanych.

STRESZCZENIE

Celem opracowania była analiza charakteru zmian pola naprężenia generowanego przez niezgodności w złączach spawanych za pomocą symulacji metodą elementów skończonych.

Na początku w celu określenia warunków brzegowych wykonano kilkustopniowy proces walidacji symulacji. W pierwszym kroku dobrano ekstrapolacją Richardsona najbardziej użyteczny z punktu widzenia ekonomiki i dokładności symulacji typ siatki i rozmiar elementu skończonego. Następnie wykonano metodą MAG dziewięć złączy doczołowych z spoiną czołową ze sztucznie wprowadzonymi niezgodnościami gniazd pęcherzy, braku przetopu oraz przyklejenia. Wykonane złącza poddano próbie rozciągania do granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. Wybrane złącza poddano badaniom metalograficznym makro- i mikroskopowym. Badania makroskopowe z użyciem odczynnika FRY wykazały zmianę rozkładu pola naprężenia w zależności od typu niezgodności, natomiast badania mikroskopowe ujawniły mikropęknięcia będące efektem koncentracji naprężenia pochodzącej od niezgodności.

W dalszej części pracy wykonano serię symulacji MES różnego typu złączy zawierających wybrane niezgodności poddane różnym kombinacjom obciążeń. Wykonano symulacje statyczne oraz zmęczeniowe. Dla wybranych złączy zastosowano metody analityczne z obszaru mechaniki pęknięcia w celu oszacowania bezpiecznego zakresu ich pracy. W zależności od typu niezgodności wyznaczono metodą symulacji wartości współczynnika koncentracji naprężenia SIF oraz współczynnika intensywności naprężenia K_I .

Na bazie przeprowadzonych badań w zakończeniu pracy sformułowano poniższe wnioski: po pierwsze, wybór trybu obliczeń bez uwzględnienia zakresu plastycznego prowadzi do błędnych wniosków z powodu znacznie zawyżonych wyników naprężenia zredukowanego, po drugie, dla otrzymania właściwych wyników obliczeń niezbędne jest wykonanie wykresu naprężenie-odkształcenie dla materiału rodzimego i osobno dla stopiwa materiału dodatkowego oraz wprowadzenie tych zależności do symulacji, po trzecie, niezgodności obłe, takie jak pęcherze, są znacznie mniej niebezpieczne niż mające ostre krawędzie pęknięcia, przyklejenia czy braki przetopu, po czwarte, należy przeprowadzić dodatkowe analizy uwzględniające poziom ciśnienia w pęcherzach, co może dać wgląd w mechanizm zjawiska pęknięcia kruchego powodowanego tzw. chorobą wodorową, po piąte, stwierdzono znaczne różnice w kształcie pola naprężenia w zależności od typu przyłożonego obciążenia, po szóste, strefy uplastycznienia generowane przez niezgodności, zwłaszcza wychodzące na powierzchnię spoiny, mogłyby mieć zauważalny wpływ na pracę maszyn i urządzeń, po siódme, analiza pola naprężenia dla grupy pęknięć pozwala stwierdzić, że dla najprostszych konstrukcji spawanych pracujących w warunkach statycznych i quasi-statycznych obciążeń i niebędących konstrukcjami przemysłowymi można na najniższym poziomie jakości D

dopuszczyć pęknięcie, po ósme, w stosowanych algorytmach projektowania nie jest uwzględniony parametr poziomu jakości, co może skutkować zauważalnym przewymiarowaniem konstrukcji spawanych.

W osobnym rozdziale zaprezentowano zastosowanie analizy wpływu niezgodności spawalniczych na wystąpienie rzeczywistych stanów awaryjnych w konstrukcjach spawanych, głównie w rurociągach.

Fragmety recenzji

„Przedstawiona w monografii tematyka badawcza związana z analizą pola naprężeń, jakie powstaje w obszarach wokół pojawiających się niezgodności spawalniczych, jest ważna z punktu widzenia eksploatacji konstrukcji spawanych, bowiem niezgodności te mogą stanowić zagrożenie dla ich pracy poprzez rozwój różnego rodzaju pęknięć eksploatacyjnych, których efektem może być zniszczenie złącza. W dostępnej literaturze brak jest tego typu zagadnień odnoszących się właśnie do powstających w złączach spawanych niezgodności spawalniczych.

Uważam, że zebrany materiał należy ocenić bardzo pozytywnie. Stanowi on obszerny i cenny zbiór danych na temat modelowania naprężeń w złączach spawanych z niezgodnościami spawalniczymi. Można stwierdzić, że zebrane informacje są w wielu przypadkach unikatowe zarówno w skali krajowej, jak i światowej. Biorąc pod uwagę obszar potencjalnego zastosowania złączy spawanych w wielu gałęziach przemysłu oraz rolę złączy spawanych szczególnie w konstrukcjach obciążanych dynamicznie, przedstawiona tematyka jest ważna i aktualna”.

Dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. uczelni (Politechnika Warszawska)

„Obok prostych analiz numerycznych spawalniczych procesów wytwarzania służących zwykle optymalizacji oraz walidacji tych procesów istnieje również możliwość oceny trwałości konstrukcji w różnych warunkach obciążenia oraz ryzyka powstawania pęknięć. Rozwój oprogramowania w tej dziedzinie pozwala dzisiaj projektantom oraz inżynierom spawalnikom na znacznie pełniejsze wykorzystanie własności eksploatacyjnych nowoczesnych materiałów, jak również na projektowanie i wykonanie konstrukcji w sposób tańszy, pozbawiony szeregu wad.

Analiza charakteru zmian pola naprężenia generowanego przez niezgodności występujące w złączach spawanych za pomocą symulacji metodą elementów skończonych praktycznie nie znajduje odniesienia we współczesnej literaturze. Przedstawiona metodyka dotycząca symulacji, jak też wyniki przeprowadzonych badań są unikatowe nie tylko w kraju, ale zapewne zostaną docenione również poza nim.

Przedstawiona mi do recenzji monografia (...) jest oryginalną monografią opartą na dużym doświadczeniu naukowo-badawczym Autorów i wypełnia brakującą lukę wiedzy w tym zakresie tematycznym. Podjęta tematyka niniejszego opracowania jest aktualna i obejmuje głównie stan wiedzy z ostatniego dziesięciolecia. Stanowi ona ważny wkład w dziedzinie symulacji procesów spawalniczych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu niezgodności spawalniczych na jakość konstrukcji spawanych oraz możliwość ich eksploatacji”.

Dr hab. inż. Jacek Górka, prof. uczelni (Politechnika Śląska)

ISBN 978-83-7193-756-9
e-ISBN 978-83-7193-757-6