

# Analiza nośności granicznej wybranych pękniętych płyt spawanych – zagadnienia *undermatching*

## The analysis of the limit loads of selected cracked welded plates – the *undermatching* issues

MARCIN GRABA \*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.205>

Zaprezentowano rezultaty numerycznej weryfikacji nośności granicznej rozciąganych, spawanych płyt z dwustronnym pęknięciem w odniesieniu do formuł zaproponowanych w procedurach FITNET. Analiza dotyczyła wybranych przypadków geometrii płyty, a niedopasowanie materiału spoiny i materiału bazowego ograniczono do przypadków *undermatching* – gdy materiał spoiny jest słabszy od materiału bazowego płyty.

**SŁOWA KLUCZOWE:** nośność graniczna, płyta spawana, płyta DEN(T), *undermatching*, strefa plastyczna

*The paper presents the results of numerical verification of the limit loads of DEN(T) welded plates, referring to the formulas proposed in the FITNET procedures. The analysis concerned on selected cases of geometry plate, and the mismatch of the weld and base material was limited to the cases of undermatching.*

**KEYWORDS:** limit loads, welded plate, DEN(T) plate, *undermatching*, plastic zone

Połączenia spawane są od wielu lat przedmiotem rozważań naukowych i inżynierskich. Doczekały się wielu publikacji, a także ujęcia zasad obliczania połączeń spawanych w dokumentach normatywnych. Dotyczy to zarówno krajowego, jak i europejskiego środowiska naukowego.

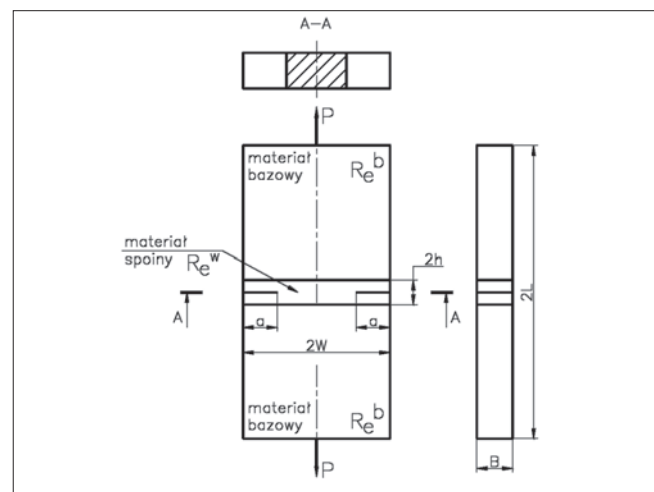
W 2004 r. działająca pod patronatem Unii Europejskiej grupa badaczy-inżynierów przedstawiła dokument znany jako procedury SINTAP [1]. W 2006 r. doczekał się on publikacji pod nazwą FITNET [2]. Komisja Europejska zaleca wykorzystywanie tej publikacji w ocenie wytrzymałości różnych elementów konstrukcyjnych zawierających defekty, co znalazło odzwierciedlenie w podręczniku [3].

Obok rozważań dotyczących elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiału jednorodnego, procedury FITNET [2,3] prezentują zalecenia, jak oszacować obciążenia graniczne – nośność graniczną, spawanych elementów konstrukcyjnych, w których pojawiły się defekty.

Autorzy procedur [2] przedstawili kompleksowe rozważania dotyczące płyt rozciąganych z różnie ułożonym defektem, pękniętych belek zginanych, a nawet spawanych rur, w których pojawiły się defekty. Przy rozważaniu konstrukcji spawanych autorzy procedur [2] pomijają szerokość strefy wpływu ciepła (SWC), a pęknięcie lokują w centrum spoiny, na granicy spoiny i materiału bazowego, względnie rozważają połączenie zgrzewane [3].

Jedną z rozważanych geometrii spawanych płyt jest płyta z obustronnym pęknięciem, oznaczona jako DEN(T) – rys. 1, w której defekt znajduje się w środku spoiny. Geometrię tej płyty można w pełni scharakteryzować za pomocą następujących parametrów:

- $a$  – długości defektu;
- $2h$  – całkowitej szerokości spoiny;
- $2W$  – całkowitej szerokości płyty;
- $B$  – grubości płyty;
- $2L$  – całkowitej długości płyty;
- $R_e^b$  – granicy plastyczności dla materiału rodzimego (base);
- $R_e^w$  – granicy plastyczności dla spoiny (weld);
- $M$  – współczynnika niedopasowania materiału spoiny i materiału rodzimego, liczonego jako  $M = R_e^w/R_e^b$ ;
- $\psi$  – współczynnika będącego funkcją wymiarów geometrycznych płyty, liczonego jako  $\psi = (W - a)/h$  [3].



Rys. 1. Spawana płyta z dwustronną szczeliną pękniętą w środku spoiny

Na podstawie wymiarów geometrycznych płyty, charakterystyki materiałowej bazy i spoiny oraz nośności granicznej  $P_0$  takiego elementu konstrukcyjnego dla przypadku dominacji płaskiego stanu odkształcenia (PSO) można oszacować – zgodnie z rozwiązaniem podanym w procedurach EPRI [4]:

$$P_0 = (0,72 + 1,82 b/W) \cdot \sigma_0 \cdot W \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_0$  – granica plastyczności, za którą przyjmuje się mniejszą wartość spośród granicy plastyczności materiału bazowego  $R_e^b$  i materiału spoiny  $R_e^w$ .

Jednak według autorów procedur FITNET [3] takie podejście nie jest właściwe. Na podstawie szeregu rozważań zaproponowali oni nieco inny schemat oszacowania nośności granicznej, który uwzględnia współczynnik niedopasowania materiału bazowego i materiału spoiny oraz wymiary charakterystyczne spoiny. Wzory te podali zarówno dla przypadku, gdy materiał spoiny jest mocniejszy od materiału bazy ( $M > 1$ ) – *overmatching*, jak i dla rozważanego w niniejszej pracy zagadnienia, gdy materiał spoiny

\* Dr inż. Marcin Graba (mgraba@tu.kielce.pl) – Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

jest słabszy od materiału bazy ( $M < 1$ ) – *undermatching* – [1–2]. Ze względu na ich znaczną rozpiętość nie zostaną tu one przytoczone; można je znaleźć w pracach [1–3].

### Zasady modelowania MES

W obliczeniach numerycznych MES wykorzystano pakiet ADINA [5,6]. Ze względu na istniejące osie symetrii modelowano jedynie czwartą część spawanej płyty DEN(T).

Zgodnie z zaleceniami procedur FITNET [2] płytę podzielono na dwie części: część będącą spoiną (charakteryzującą się własnościami mechanicznymi materiału spoiny) oraz część modelowaną z wykorzystaniem materiału rodzimego.

Zakładano sprężysto-doskonale plastyczny model materiału, zarówno spoiny, jak i materiału rodzimego, ustalając moduł Young'a  $E = 206$  GPa, współczynnik Poissona  $\nu = 0,3$ , granicę plastyczności materiału rodzimego  $R_e^b = 275$  MPa; przy czym granicę plastyczności materiału spoiny wyznaczono z relacji  $R_e^w = M \times R_e^b$ , zakładając różne wartości współczynnika niedopasowania materiału spoiny i materiału rodzimego  $M = \{0,25; 0,30; 0,35; 0,50; 0,65; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95\}$ .

Wybór granicy plastyczności nie jest przypadkowy – wartość wykorzystana w obliczeniach numerycznych odpowiada charakterystyce materiałowej stali S275J, którą stosuje się w konstrukcjach spawanych w budowie maszyn oraz w budownictwie stalowym, jak również do wytwarzania dźwigni, trzpieni, osi czy wałów nieznacznie obciążonych. W obliczeniach założono stałą szerokość płyty  $W = 40$  mm, długość  $L = 80$  mm, względną stałą długość pęknięcia  $a/W = 0,50$  (rozważania dla bardzo krótkich, krótkich oraz długich szczelin zostaną opublikowane wkrótce) i różną szerokość spoiny  $H = \{0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0\}$ .

Wierzchołek pęknięcia modelowano w postaci półokręgu o promieniu  $r_w = 1$   $\mu\text{m}$ , który podzielono w kierunku obwodowym na 24 części. Obszar przywierzchołkowy o promieniu 250  $\mu\text{m}$  podzielono w kierunku promieniowym na 18 elementów skończonych (ES), przy czym najmniejszy (zlokalizowany przy wierzchołku pęknięcia) był 20 razy mniejszy od ostatniego w tym obszarze.

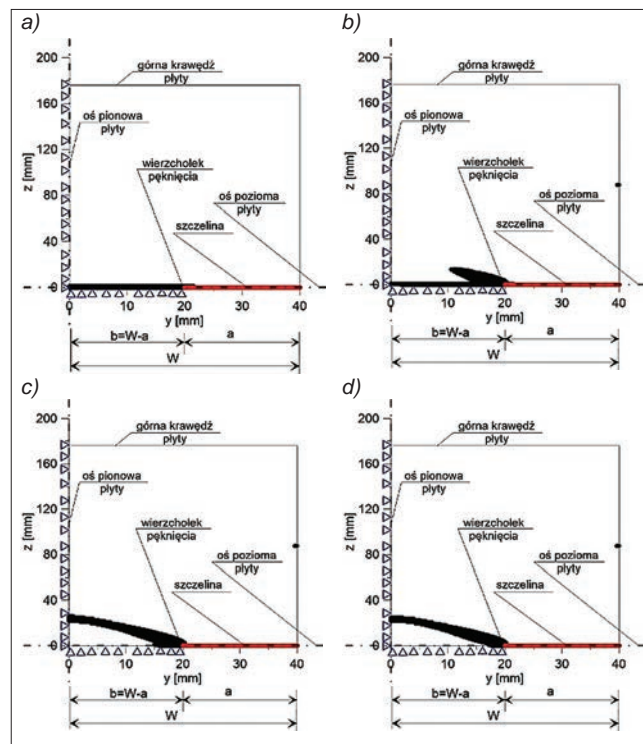
Cały model MES wypełniono w sumie 12 716 dziewięciowęzłowymi ES typu 2D PLANE STRAIN SOLID (z dziewięcioma punktami całkowania numerycznego, ES z interpolacją sformułowaną jako *mixed*), co oznacza, że w modelu tym wykorzystano 51 267 węzłów. Obciążenie zewnętrzne przykładano do górnej krawędzi płyty w postaci liniowo rosnącego w czasie przemieszczenia.

### Wybrane rezultaty obliczeń MES

Za stan osiągnięcia przez płytę nośności granicznej przyjęto moment, w którym cały niepęknięty odcinek próbki stał się uplastyczniony – ocenę tego przeprowadzono na podstawie analizy rosnącej wraz z obciążeniem zewnętrznym strefy plastycznej. Za uplastyczniony obszar przyjęto fragmenty próbki, w których naprężenia efektywne liczone według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego osiągnęły wartość równą lub większą od granicy plastyczności – odpowiednio materiału spoiny lub materiału rodzimego, w zależności od lokalizacji.

Na rys. 2 zaprezentowano przykładowe rozkłady stref plastycznych zarejestrowane w trakcie prowadzenia obliczeń numerycznych dla płyt spawanych z centralną szczeliną, o szerokości spoiny  $2H = 2$  mm.

W przypadku płyt spawanych, które charakteryzują się znacznym niedopasowaniem materiału spoiny i materiału rodzimego, w momencie osiągnięcia pełnego uplastycznienia niepękniętego odcinka próbki strefę plastyczną obserwuje się jedynie w obszarze spoiny (rys. 2a). Spoina w małym stopniu ulega uplastycznieniu, gdy współczynnik niedopasowania jest większy lub równy  $M \geq 0,75$  – strefa plastyczna, powodująca uplastycznienie niepękniętego odcinka próbki, rozwija się od wierzchołka pęknięcia wzdłuż linii nachylonej do poziomej osi próbki pod kątem mniejszym niż  $30^\circ$  (rys. 2c, d).



Rys. 2. Wpływ współczynnika niedopasowania na rozkład strefy plastycznej w momencie osiągnięcia przez płytę spawaną DEN(T) stanu nośności granicznej (szerokość całkowita spoiny  $2H = 2$  mm): a)  $M = 0,25$ ; b)  $M = 0,50$ ; c)  $M = 0,75$ ; d)  $M = 0,90$

Oszacowane numerycznie wartości nośności granicznej zobrazowano dwoma rysunkami. Na rys. 3 zaprezentowano wpływ szerokości spoiny przy zmiennym niedopasowaniu materiału rodzimego i materiału spoiny, natomiast na rys. 4 – odwrotną zależność.

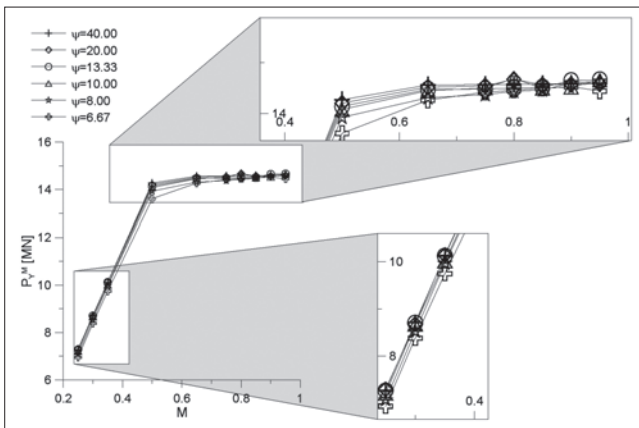
Z analizy wynika, że w rozpatrywanym zakresie współczynników niedopasowania  $M$  szerokość spoiny niemal nie wpływa na poziom obciążenia granicznego przy tym samym poziomie współczynnika niedopasowania  $M$ . Maksymalne różnice procentowe w wartościach obciążeń granicznych między spoiną o szerokości  $2H = 1$  mm a spoiną o szerokości  $2H = 2$  mm wynoszą ok. 0,7% (przy tej samej wartości współczynnika niedopasowania materiału rodzimego i materiału spoiny), a średnia różnica dla całego zbioru danych to ok. 0,04%. Jeżeli porówna się wartości nośności granicznej dla płyt o spoinie  $2H = 1$  mm oraz 6 mm, maksymalne różnice przy tej samej wartości współczynnika niedopasowania  $M$  wynoszą 4,6%, a średnia różnica dla całego spektrum współczynników niedopasowania to ok. 2,3%.

W rozpatrywanym zakresie szerokości spoiny, w przypadku dominacji PSO oraz sytuacji *undermatching* (współczynnik niedopasowania materiału rodzimego i materiału bazy  $M < 1$ ), obserwuje się ewidentną zależność poziomu nośności granicznej (obciążenia granicznego) od współczynnika niedopasowania  $M$  (rys. 4). Im mniejsza wartość współczynnika niedopasowania – większa różnica

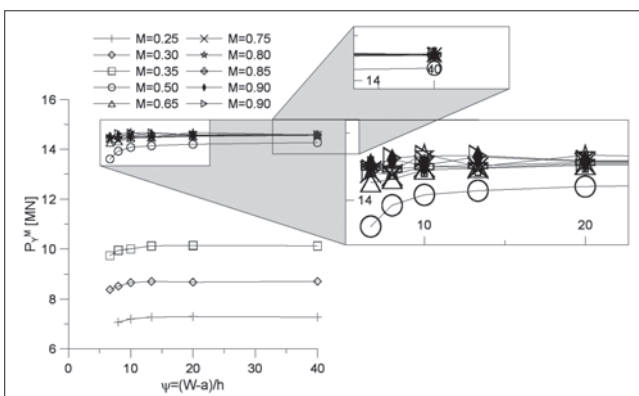
w granicy plastyczności materiału spoiny i materiału rodzimego – tym niższa wartość nośności granicznej.

Dla płyt spawanych, w których współczynnik niedopasowania materiału spoiny i materiału rodzimego  $M = 0,90$ , obciążenie graniczne spada maksymalnie o 1% w stosunku do wartości nośności granicznej oszacowanej dla  $M = 0,95$  (średni spadek wynosi ok. 0,12% dla całego rozpatrywanego zakresu szerokości pęknięcia). Odnosząc kolejne wartości obciążenia granicznych dla kolejnych płyt przy różnym współczynniku niedopasowania materiału rodzimego i materiału spoiny do nośności granicznej dla  $M = 0,95$ , uzyskuje się następujące różnice względne: dla  $M = \{0,85; 0,80; 0,75; 0,65; 0,50; 0,35; 0,30; 0,25\}$  maksymalne różnice wynoszą odpowiednio  $\{1,12\%; 1,31\%; 1,23\%; 2,18\%; 5,76\%; 32,54\%; 41,97\%; 51,93\%\}$ , średnie różnice wynoszą odpowiednio  $\{0,51\%; 0,27\%; 0,77\%; 1,13\%; 3,81\%; 31,38\%; 41,00\%; 50,81\%\}$ .

Daje się zauważyć, że wpływ współczynnika niedopasowania materiału spoiny i materiału rodzimego na nośność graniczną płyt spawanych ze szczeliną umieszczoną w środku spoiny jest widoczny, gdy wartość współczynnika niedopasowania  $M < 0,65$ .



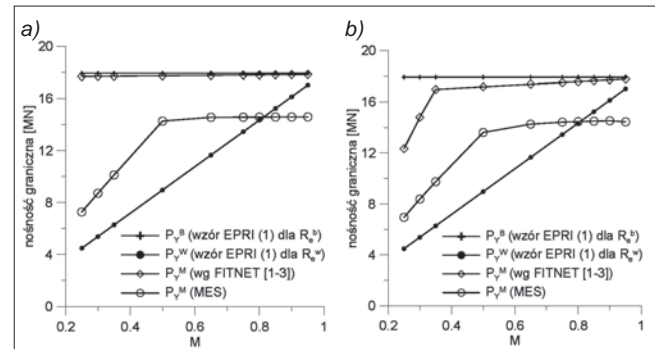
Rys. 3. Wpływ szerokości spoiny na poziom nośności granicznej spawanej płyty DEN(T) ze szczeliną w spoinie (dominacja PSO,  $W = 40$  mm,  $a/W = 0,50$ ,  $R_e^b = 275$  MPa)



Rys. 4. Wpływ współczynnika niedopasowania  $M$  na poziom nośności granicznej spawanej płyty DEN(T) ze szczeliną w spoinie (dominacja PSO,  $W = 40$  mm,  $a/W = 0,50$ ,  $R_e^b = 275$  MPa)

Oszacowane numerycznie wartości nośności granicznej porównano z wartościami uzyskanymi na podstawie procedur [2] i [4] (rys. 5). Nośność graniczna wyznaczana według procedur FITNET okazuje się podejściem mało konserwatywnym – wyniki są zawyżone, co może doprowadzić do zniszczenia elementu konstrukcyjnego. Przedstawione wyniki powinny zostać zweryfikowane doświadczalnie, należy jednak pamiętać, że rzeczywisty element konstrukcyjny jest wykonany z materiału sprężysto-pla-

stycznego o określonym poziomie umocnienia, a w rozważaniach teoretyczno-numerycznych nośność graniczną wyznacza się przy założeniu materiału sprężysto-doskonale plastycznego (bez wzmocnienia). Ewentualna weryfikacja doświadczalna zapewne potwierdziłaby konserwatywność każdego wspomnianego rozwiązania i w zależności od potrzeb oraz możliwości jedno z tych rozwiązań uznano by za właściwe.



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń numerycznych nośności granicznej dla spawanych płyt DEN(T) ze szczeliną w centrum spoiny z rozwiązaniami procedur [2] i [4]: a)  $\psi = 40$ ;  $2H = 1$  mm; b)  $\psi = 6,67$ ;  $2H = 6$  mm

## Podsumowanie

Zaprezentowano rezultaty numerycznej weryfikacji nośności granicznej spawanych płyt z centralną szczeliną rozciąganych w jednym kierunku, odnosząc się do formuł zaproponowanych w procedurach FITNET [2]. Analiza dotyczyła wybranych geometrii płyty, a niedopasowanie materiału spoiny i materiału bazowego ograniczono do przypadków *undermatching* – gdy materiał spoiny jest słabszy od materiału bazowego płyty.

Krótko przedstawiono zasady opracowania modelu MES, zaprezentowano wybrane rezultaty obliczeń numerycznych, które zobrazowano rozkładami rozwijających się stref plastycznych. Jak pokazano, rozkład strefy plastycznej zależy od niedopasowania materiału bazowego i materiału spoiny oraz – w mniejszym stopniu – od szerokości spoiny – zwłaszcza gdy materiał spoiny jest dużo słabszy od materiału bazowego. Nośność graniczna zależy nie tylko od granicy plastyczności obu materiałów, lecz także od poziomu ich niedopasowania oraz szerokości spoiny, jednak w dość małym stopniu.

**Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, numer: 01.0.09.00/2.01.01.01.0027 MNSP.MKTM.17.002.**

## LITERATURA

1. SINTAP Procedure: "Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. Final Procedure". Brite-Euram Project No BE95-1426. Rotherham: British Steel, 1999.
2. Kocak M., Webster S., Janosch J.J., Ainsworth R.A., Koers R. "FITNET Report, (European Fitness-for-service Network)". Contract No. G1RT-CT-2001-05071, 2006.
3. Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J. "The assessment of the strength and safety of the operation high temperature components containing crack". Kielce: Kielce University of Technology Publishing House, 2008.
4. Kumar V., German M.D., Shih C.F. "An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis". Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, Inc., EPRI Report NP-1931, 1981.
5. ADINA 8.7.3: "ADINA: Theory and Modeling Guide – Volume I: ADINA". Report ARD 08-7, ADINA R&D, Inc., 2008.
6. ADINA 8.7.3: "ADINA: User Interface Command Reference Manual – Volume I: ADINA Solids & Structures Model Definition". Report ARD 08-6, ADINA R&D, Inc., 2008.