

Analiza numeryczna rozwoju pęknięć lamelarnych w strukturze ferrytyczno-perlitycznej z wtrąceniami niemetalicznymi

WSTĘP

W blachach stanowiących elementy konstrukcyjne obecnie eksploatowanych urządzeń często występują nieciągłości wewnętrzne w postaci długich, cienkich włókien ułożonych na kierunku walcowania [1]. W wyniku spawania blach zawierających tego typu wady powstaje w materiale stan naprężeń, wywołujący oddzielenie się osnowy stalowej od wad oraz ich łączenie się [2]. Łączenie się wad w postaci pęknięcia lamelarnego inicjują również obciążenia eksploatacyjne [2][4]. Postępujący proces pęknięcia lamelarnego nierazko prowadzi do utraty nośności elementu [1]. Praca zawiera numeryczną analizę rozwoju pęknięć lamelarnych w strukturze ferrytyczno-perlitycznej blachy. Badany był wpływ obciążenia blachy, lokalizacji wtrąceń i orientacji ich względem siebie na kierunki propagacji pęknięć.

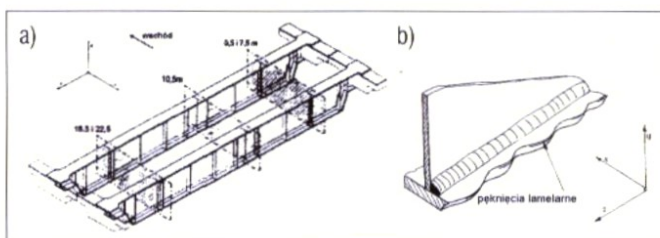
Cel badań

Celem badań było poznanie kierunków orientacji pęknięć struktury ferrytyczno-perlitycznej blachy zawierającej pasmowe wtrącenia na podstawie analizy map naprężeń i odkształceń. Mapy uzyskano jako rozwiązanie obciążonego modelu blachy metodą elementów skończonych w programach Ansys 9.0 i Femap 8.0. Założeniem badań było, by modelowana struktura blachy była jak najbardziej zbliżona pod względem geometrii i obciążeń do eksploatowanych elementów.

Pęknięcia wystąpią w miejscach struktury, w których naprężenia zredukowane przekroczą wytrzymałość materiałów. Dlatego obserwowano, jaki wpływ na miejsce wystąpienia maksymalnych naprężeń mają następujące czynniki: kierunek obciążenia blachy, zaleganie między sobą wtrąceń, kierunek orientacji wtrąceń względem siebie, wpływ dwustopniowego obciążenia na inicjację pęknięć.

Model struktury blachy

Modelowana struktura stanowi jeden ze zglądów, jakie były wykonywane w badaniach A. Bluma, dotyczących sprężania technologicznego suwnic [1]. Przedstawiony na rysunku 2 zgląd został wykonany z wycinka blachy, która pracowała jako pas dolny dźwigarą mostu skrzynkowego suwnicy (rys. 1).



Rys. 1. Dźwigary blachownicowego mostu a – suwnicy pomostowej, b – pęknięcia lamelarne blach badanych pasów dźwigarów suwnic [1]

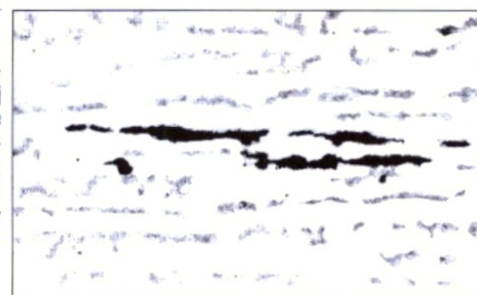
Tablica 1. Parametry materiałowe blachy

Materiał elastoplastyczny	Perlity	Ferryt
Moduł Younga w zakresie sprężystym E	206 GPa	204 GPa
Moduł umocnienia w zakresie plastycznym E_p	10 GPa	10 GPa
Współczynnik Poissona ν	0,3	0,3
Granica plastyczności R_e	400 MPa	150 MPa
Granica wytrzymałość na rozciąganie R_m	650 MPa	300 MPa

Mikrostruktura modelowanego zglądu o rozmiarze 300 x 180 μm , z widoczną pasmową strukturą stali ferrytyczno-perlitycznej z dużymi wtrąceniami zorientowanymi na kierunku walcowania blachy, charakterystyczna dla procesu walcowania jednokierunkowego (rys. 2). Parametry materiałowe składników struktury stali podano w tablicy 1 oraz na rysunku 3. Wtrącenia niemetaliczne modelowano jako materiał bardzo plastyczny o module Younga $E=1$ MPa i współczynnika Poissona $\nu=0,5$.

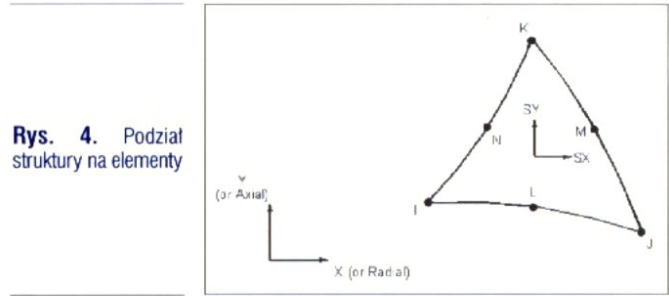
Równania nieliniowe rozwiązano metodą Newtona – Rapsosa, natomiast naprężenia zredukowano hipotezą Burzyńskiego. Struktura została podzielona na elementy trójkątne, płaskie, sześciowęzłowe typu plane 2 (rys. 4). Każdy z węzłów ma dwa stopnie swobody (przemieszczeń). Elementy te rekomendowane są przez firmę Ansys do obliczeń naprężeń i odkształceń wokół szczeliny [3].

Rys. 2. Mikrostruktura modelowanej stali o rozmiarze 300 x 180 μm ; wtrącenia – kolor czarny, perlity – kolor szary, ferryt – kolor biały [1]





Rys. 3. Przyjęte dwuliniowe charakterystyki elastoplastyczne ze wzmocnieniem dla perlitu i ferrytu



Rys. 4. Podział struktury na elementy

Przyjęcie obciążeń modelu struktury blachy

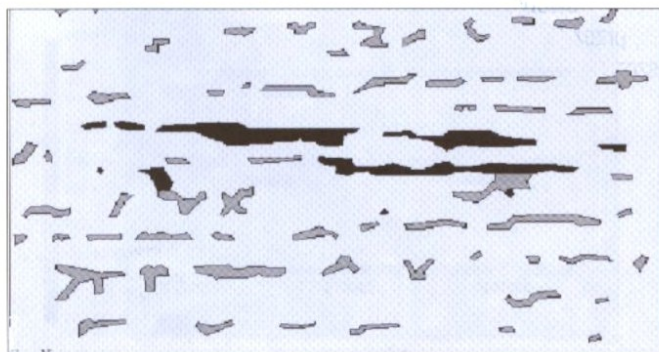
W elementach konstrukcyjnych, pracujących jako pasy dolne dźwigarów mostu, występują głównie naprężenia normalne na kierunku walcowania blach, wywołane obciążeniem eksploatacyjnym, oraz naprężenia na kierunku grubości blachy, powstałe po przyspawaniu do pasów przepon. Dlatego modelowana struktura była obciążana na kierunku walcowania blachy (oś x) i na kierunku grubości blachy (oś y). W pierwszym etapie badań szukano największych obciążeń, dla których „zdrowa” blacha pracuje w zakresie sprężystym. Pola wtrąceń zastąpiono ferrytem, uzyskując na podstawie zglądu, pokazanego na rysunku 2, wycinek blachy bez nieciągłości wewnętrznych. Na podstawie rozwiązań modelu dla różnych odkształceń względnych przyjęto, jako graniczną wartość obciążenia, które nie powoduje uplastycznienia struktury blachy, wielkość 0,1%.

Analiza numeryczna modelu rzeczywistego blachy

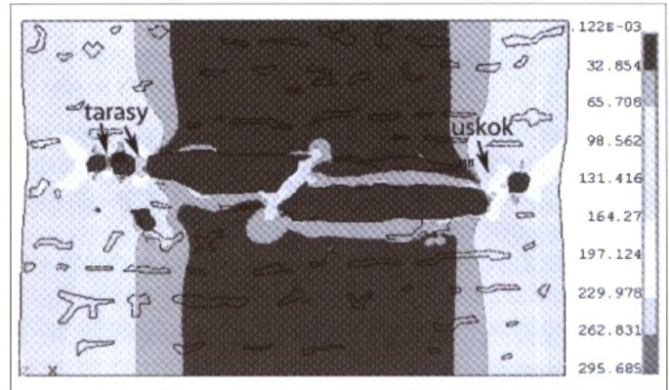
Drugim etapem było poddanie obciążeniom rzeczywistego modelu struktury walcowanej blachy zawierającej wtrącenia. Model numeryczny przeniesionej struktury zglądu przedstawiono na rysunku 5. Geometria została podzielona na elementy trójkątne, sześciowzłowe typu plane 2. Siatka została zagęszczona na krawędziach wtrąceń.

Model struktury, przedstawionej na rysunku 5, obciążono przemieszczeniem względnym pionowym o wartości $e_y=0,1\%$. Mapę naprężeń zredukowanych hipotezą Burzyńskiego dla tego obciążenia przedstawiono na rysunku 6. Pomiedzy wtrąceniami wystąpiły naprężenia bliskie granicy wytrzymałości ferrytu R_m na orientacji zarazem uskoków i tarasów (rys. 6). Maksymalne naprężenie zredukowane wynosi 295 MPa. Ponieważ przekrój materiałów o większej wytrzymałości został zmniejszony przez pole wtrąceń, struktura ma małą wytrzymałość na obciążenia działające na kierunku osi y .

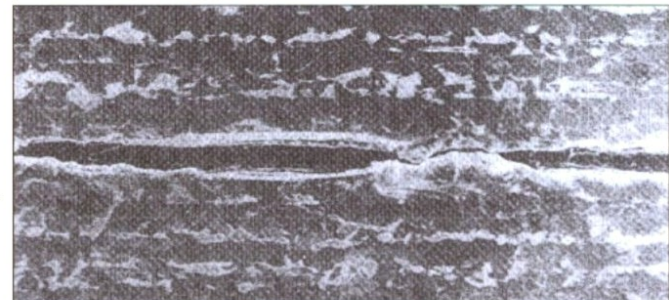
Wyniki te są zgodne z obserwacjami procesu pękania lamelarnego, które zostały przeprowadzone na podstawie badań eksperymentalnych (rys. 7) [2]. Rozkład naprężeń wskazuje na to, że



Rys. 5. Model numeryczny mikrostruktury blachy. Kolorami zostały zaznaczone materiały: ferryt – biały, perlit – szary, wtrącenie – czarny



Rys. 6. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej przemieszczeniem $e_y=0,1\%$

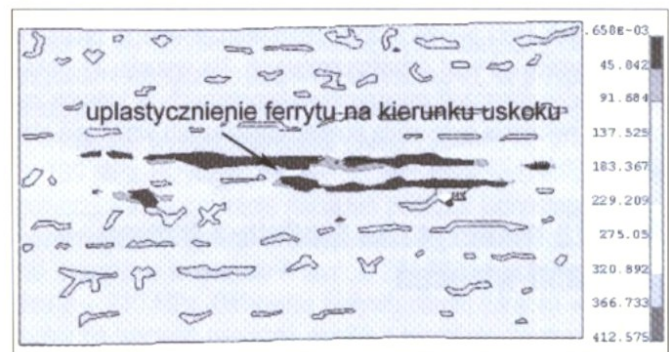


Rys. 7. Połączenie dwóch mikropęknięć utworzonych wokół wtrąceń niemetalicznych. Mikroskop skaningowy. Pow. 300x [2]

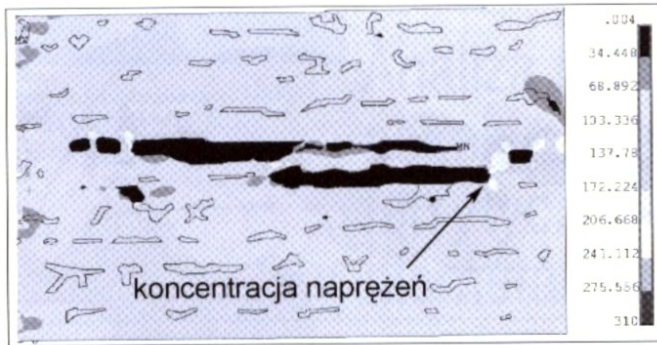
w przypadku większego obciążenia wtrącenia połączyłyby się między sobą w postaci tarasów i uskoków, opisując trójetapowy proces łączenia [2].

Następnie strukturę obciążono względnym przemieszczeniem poziomym $e_x=0,1\%$ (rys. 8). Większa część struktury stali pracowała w zakresie sprężystym, jednak pomiędzy blisko zalegającymi wtrąceniami zaobserwowano uplastycznienie ferrytu na kierunku uskoków. Maksymalne naprężenie występuje punktowo i wynosi 412 MPa, powodując uplastycznienie ziarna perlitu.

Czysty ferryt może przenosić obciążenia, jeżeli odkształcenia względne nie przekroczą $e_x=1,6\%$. W przypadku badanej struktury obciążonej przemieszczeniem poziomym $e_x=1\%$ zaobserwo-



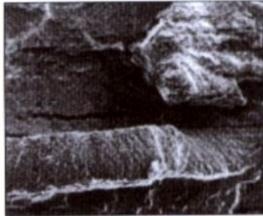
Rys. 8. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej przemieszczeniem $e_x=0,1\%$



Rys. 9. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej najpierw przemieszczeniem $e_y=0,1\%$, a następnie przemieszczeniem $e_x=0,5\%$

wano w ziarnach ferrytu pomiędzy blisko leżącymi wtrąceniami naprężenia wynoszące 400 MPa. Ze względu na to, że została przekroczona granica wytrzymałości ferrytu R_m , wystąpiły w miejscu struktury pęknięcia w formie uskoków (rys. 8).

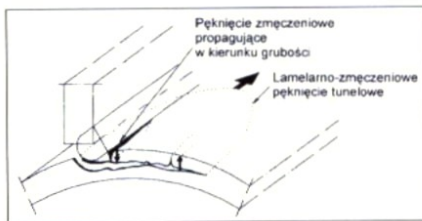
Badana struktura została również obciążona w dwóch etapach przemieszczeniami $e_y=0,1\%$, a następnie $e_x=0,5\%$. Obciążenia te modelowały technologiczne wykonanie dźwigara, gdzie



Rys. 10. Ogniska zmęczeniowe inicjowane przez pasma propagujące od wewnątrz blachy [4]

był on obciążany poniżej obliczeniowej granicy plastyczności blach oraz jego przeciążenie eksploatacyjne powyżej granicy plastyczności struktury. Na mapie naprężeń widoczne są spodziewane pola uplastycznienia materiału. Wytrzymałość materiałów została przekroczona tylko w ziarnach ferrytu ułożonych na prawym końcu długiego, dolnego wtrącenia (rys. 9).

Jest to zgodne z wynikami podanymi w literaturze zmodyfikowanej próby otworowej [4]. Pęknięcia zmęczeniowe nie tylko inicjowane są na powierzchni materiału w kierunku jego grubości, ale też, niezależnie od nich, ogniska zmęczeniowe powstają wewnątrz blachy na krawędziach pasm rozwarstwień – wtrąceń (rys. 10).



Rys. 11. Przykład zniszczeń zmęczeniowo-lamelarnych [4]

Proces ten zwiększa spiętrzenie naprężeń i tym samym przyspiesza zniszczenie elementu, nawet w przypadku wyhamowania na wtrąceniach czoła pęknięcia zmęczeniowego głównego, propagującego zwykle od wad powierzchniowych. Na rysunku 11 pokazano proces zniszczeń zmęczeniowo-lamelarnych, w których zarodkiem pęknięcia była wada powierzchniowa lub wtrącenie niemetaliczne występujące wewnątrz blachy [4].

Analiza numeryczna modelu z trzema pasmami wtrąceń

W celu określenia wpływu ułożenia pasm w blasze na rozwój procesu łączenia się wtrąceń wykonano model blachy ze struktu-

rą pasmową wtrąceń. Jako materiał blachy przyjęto ferryt, będący składnikiem słabszym stali (tabl. I). Wtrącenia były ułożone w różnej odległości od siebie.

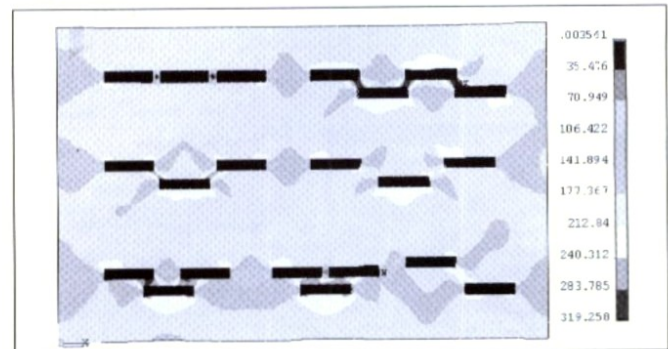
Dla modelu obciążonego na kierunku walcowania przemieszczeniem względnym $e_x=0,1\%$ maksymalne naprężenia zredukowane wynoszą $\sigma_{zr} = 199$ MPa. Są one mniejsze od wytrzymałości ferrytu. Koncentracja naprężeń wskazuje, że przy tego typu obciążeniach może nastąpić ścięcie w postaci uskoków między wtrąceniami, których krawędzie znajdują się najbliżej siebie. Dla modelu obciążonego na kierunku grubości blachy przemieszczeniem względnym $e_y=0,1\%$ maksymalne naprężenia zredukowane wynoszą $\sigma_{zr} = 232$ MPa i również są mniejsze od $R_m = 300$ MPa. Rozkład naprężeń wskazuje na to, że w przypadku większych obciążeń nastąpi łączenie się wtrąceń zarówno w postaci tarasów, jak i uskoków. Największą podatność na tworzenie pęknięć mają wtrącenia, których krawędzie leżą najbliżej siebie.

W procesie produkcyjnym mostów suwnic skrzynkowych blachy pasów podczas spawania są obciążane naprężeniem zorientowanym na ich grubości. Niektóre obszary blachy zostają wtedy uplastycznione. Podczas pracy pasy dźwigarów przenoszą obciążenie głównie zorientowane na kierunku prostym do kierunku grubości blach. Model był poddawany dwustopniowemu obciążaniu o różnych wartościach odkształceń. Analizy te pokazały, jak przy narastającym odkształceniu wzrastają naprężenia wewnątrz blachy, prowadząc przy odkształceniu montażowym $e_y=0,1\%$ i eksploatacyjnym $e_x=0,5\%$ do wystąpienia naprężeń zredukowanych maksymalnych $\sigma_{red} = 319$ MPa i przekroczenia granicy wytrzymałości ferrytu $R_m = 300$ MPa. Powstaną wtedy wewnątrz blachy pęknięcia w postaci uskoków między najbliżej leżącymi wtrąceniami. Duże uplastycznienie osnowy może również przyczynić się do pojawienia się tarasów (rys. 12).

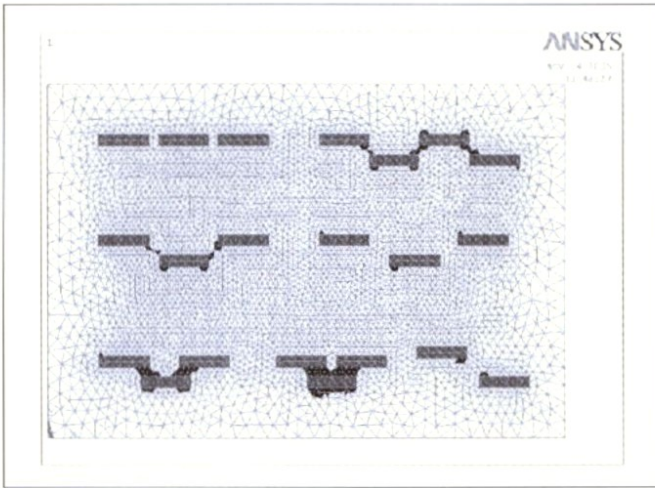
Na rysunku 13 zaznaczono kolorem czerwonym pęknięcia, jakie wytworzą się w strukturze blachy w miejscach przekroczenia wytrzymałości ferrytu po obciążeniu jej dużym odkształceniem względnym $e_x = 1\%$. Szczeliny te łączą wtrącenia między sobą w postaci tarasów. Widoczne są też pęknięcia osnowy stalowej w okolicy wtrąceń. Pomimo dużego odkształcenia nie zostały połączone wszystkie wtrącenia. Potwierdzają to wcześniejsze badania, że do zniszczenia blachy w sposób lamelarny przyczyniają się w szczególności obciążenia zorientowane na kierunku grubości blachy.

Analiza numeryczna modelu zawierającego wtrącenia o różnej orientacji względem siebie

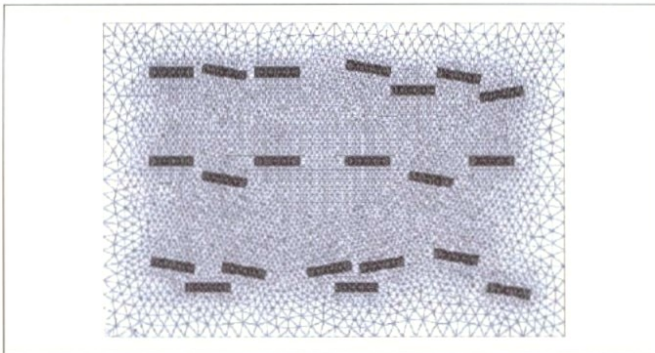
Obliczenia powtórzone dla stali ferrytycznej, zawierającej wtrącenia rozłożone na powierzchni modelu podobnie, jak w po-



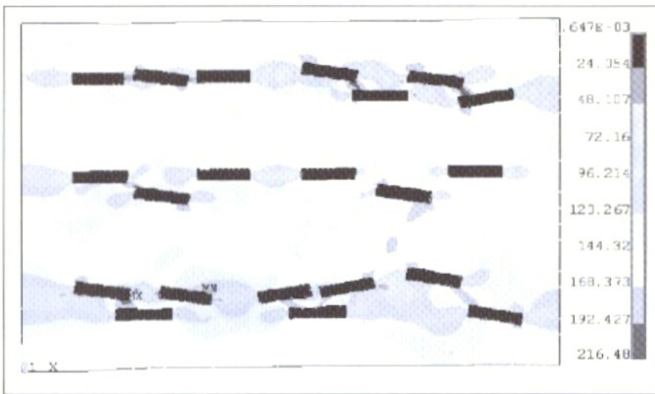
Rys. 12. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej przemieszczeniami najpierw $e_y=0,1\%$, a następnie $e_x=0,5\%$



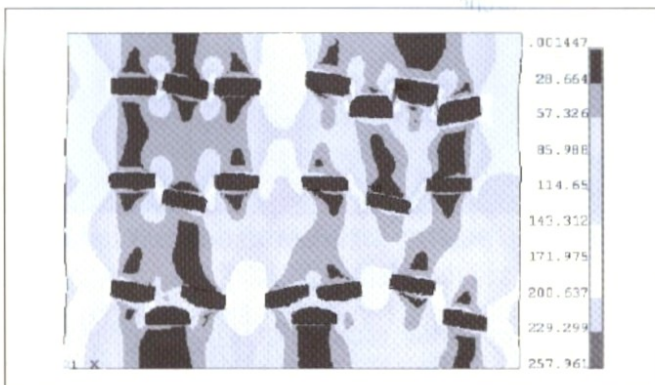
Rys. 13. Model numeryczny pęknięć (kolor czerwony) po obciążeniu przemieszczeniem $e_x=1\%$



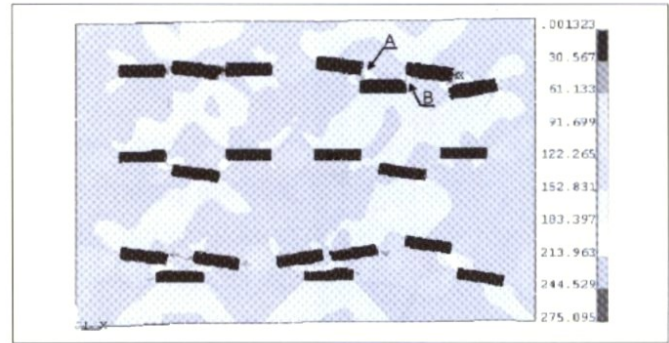
Rys. 14. Model numeryczny blachy zawierającej trzy pasma wtrąceń, zaznaczonych kolorem czerwonym, odwróconych względem poziomu o $0^\circ-10^\circ$ lub 10° (ciemny kolor)



Rys. 15. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej przemieszczeniem $e_x=0,1\%$



Rys. 16. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej przemieszczeniem $e_y=0,1\%$



Rys. 17. Mapa naprężeń zredukowanych dla blachy obciążonej przemieszczeniami najpierw $e_y=0,1\%$, a następnie $e_x=0,1\%$.

przednim modelu, lecz obrócone względem poziomu o $0^\circ-10^\circ$ lub 10° . Dobór kąta obrotu dokonano na podstawie obserwacji zglądów. Przekracza on kąt orientacji wtrąceń do kierunku walcowania blach (rys. 14). Następnie model obciążono przemieszczeniami względnymi: poziomym $e_x=0,1\%$ i pionowym $e_y=0,1\%$ (rys. 15, 16).

Obserwacje wyników analizy umożliwiają wyciągnięcie następujących wniosków.

- Kierunek zalegania wtrąceń między sobą ma większe znaczenie na nośność struktury przy obciążeniach na kierunku walcowania blachy, niż przy obciążeniach na kierunku grubości blachy.
- Decydującym parametrem geometrycznym wpływającym na wystąpienie pęknięć jest odległość między wtręciami.
- Koncentrację naprężeń obserwuje się też w materiale ferrytu pomiędzy wtręciami zwróconymi do siebie ostrymi krawędziami, szczególnie podczas obciążeń na kierunku walcowania blachy.

Model poddano również dwustopniowym obciążeniom. Największe naprężenia występujące w okolicy wtrąceń w przypadku dwukrokowego obciążania są o ok. 9% większe, niż w przypadku obciążania jednokrokowego. Struktura ferrytu została osłabiona przez uplastycznienie się stref wokół naroży szczelin. Mają one podobny charakter, jak promień strefy plastycznej w kierunku pęknięcia dla płaskiego stanu naprężeń liniowej mechaniki pęknięcia [5]. Mimo że odkształcenia realizowane w pierwszym kroku nieznacznie uplastyczniły ferryt, w drugim kroku obciążania obserwuje się, w porównaniu z jednostopniowym procesem obciążania, zmianę charakteru pęknięć między wtręciami. Parametrem geometrycznym decydującym o pękaniu, nawet w przypadku rozciągania zgodnie z osią x, staje się odległość między wtręciami. Mniejsze znaczenie, niż w przypadku jednokrokowego obciążania, ma orientacja naroży wtrąceń względem siebie. Zjawisko to najlepiej można prześledzić, porównując wartości naprężeń, jakie występują między wtręciami dla jednostopniowego rozciągania $e_x=0,1\%$ i dwustopniowego rozciągania, gdzie struktura blachy najpierw była rozciągnięta w kierunku grubości blachy $e_y=0,1\%$, a następnie w kierunku jej walcowania $e_x=0,1\%$ (rys. 16 i 17). Miejsca, w których obserwowane były naprężenia, wskazano strzałkami i oznaczono jako A i B na rysunku 17. W przypadku jednostopniowego rozciągania w osnowie ferrytycznej lokalizacji A występuje wyższe naprężenie równe 198 MPa niż w lokalizacji B: 139 MPa. Przyczyną jest zwrócenie naroży wtrąceń do siebie, powodujące koncentrację naprężeń podczas jednostopniowego, poziomego rozciągania. W przypadku dwustopniowego rozciągania naprężenie w miejscu A wynosi 221 MPa, natomiast w miejscu B – 240 MPa. Ostabienie wpływu obrotu wtrąceń względem siebie na wartość naprężeń wynika z wcześniejszego uplastycznienia, podczas obciążenia pionowego, stref leżących najbliżej wtręcenia.

WNIOSKI

Przeprowadzone analizy numeryczne potwierdziły wnioski, jakie uzyskali badacze zjawiska pęknięcia lamelarnego na podstawie eksperymentu. Szczególnie korzystnym dla inicjacji pęknięcia lamelarnego są obciążenia rozciągające zorientowane na kierunku grubości blachy. Rozwijają się one w postaci tarasów i uskoków [2]. Przez rozwiązanie modelu obciążonego kilkukrotnie zostało potwierdzone, że w elemencie obciążonym zmęczeniowo mogą być inicjowane pęknięcia na krawędziach wtrąceń, które mogą propagować z wnętrza blachy [4]. Analiza numeryczna wykazała, że parametrem geometrycznym decydującym o rozwoju pęknięcia przy obciążeniu na grubości blachy jest odległość między wtrąceniami. Kąt orientacji zalegania wtrąceń względem siebie ma pomijalne znaczenie. Łączenie się wtrąceń może być również inicjowane obciążeniem na kierunku walcowania blach. Powstałe w ten sposób pęknięcia mają charakter uskoków. W obciążeniach tego typu istotnym parametrem inicjowania pęknięć jest nie tylko odległość między wtrąceniami, ale również kąt orientacji ich względem siebie. Największa koncentracja naprężeń wystąpi, gdy krawędzie wtrąceń zostaną zwrócone do siebie, szczególnie gdy ułożone będą na kierunku występowania największych naprężeń stycznych. Obciążenie dwustopniowe blachy, powodujące niewielkie uplastycznienia struktury, zmienia korzystnie rozkład naprężeń wokół krawędzi wtrąceń. Zaobserwowano również mniejszą koncentrację naprężeń wokół zwróconych do siebie nieciągłości wewnętrznych, zalegających na różnej głębokości struktury stali, przy obciążeniach na kierunku walcowania blachy.

LITERATURA

- [1] Blum A.: Diagnostyka i regeneracja wytrzymałościowa skrzynkowych mostów suwnicowych. Biblioteka problemów eksploatacji, Radom 2002.
- [2] Pilarczyk J.: Mechanizm inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć lamelarnych. Zeszyty naukowe nr 511. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1977.
- [3] Ansys Release 9.0 documentation.
- [4] Rosochowicz K.: Badania eksperymentalne procesów zmęczenia konstrukcji kadłubów statków. Zbiór monografii pod red. Szala J. Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji. Badania konstrukcji. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2000.
- [5] Wyrzykowski J., Pleszakow E., Sieniawski J.: Odształcenie i pęknięcie metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.

Jubileusz Stowarzyszenia Techników Polskich w Wielkiej Brytanii

Stowarzyszenie Techników Polskich w Wielkiej Brytanii obchodziło 65-lecie istnienia. W Polskim Ośrodku Społeczno-Kulturalnym w Londynie, odbyło się jubileuszowe spotkanie oraz wystawa 65-lecia STP, połączone z częścią wspomnieniową i seminarium naukowo-techniczno-ekonomiczne. Wieczorem odbył się specjalny program artystyczny. Honorowy patronat nad uroczystościami objął ostatni Prezydent II RP Ryszard Kaczorowski. Jubileusz STP zgromadził przedstawicieli polonijnych stowarzyszeń inżynierskich z całego świata. Naczelna Organizacja Techniczna była reprezentowana przez prezesa FSNT-NOT Wojciecha Ratyńskiego i sekretarza generalnego Kazimierza Wawrzyniaka, którzy przekazali władzom Stowarzyszenia Techników Polskich w Wielkiej Brytanii pamiątkowy dyplom gratulacyjny. Na spotkanie przybyli koledzy ze stowarzyszeń z Niemiec, Francji, Austrii, USA i Litwy.

W drugim dniu obchodów 65-lecia STP w Wielkiej Brytanii odbyło się I Światowe Forum Polskich Federacji Naukowo-Technicznych, zorganizowane przez **Europejską Federację Polonijnych Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych** przy współudziale Stowarzyszenia Techników Polskich w Wielkiej Brytanii, inicjatora powołania Europejskiej Federacji. Forum poświęcone było tematowi polonijnej i polskiej promocji zawodów technicz-



Wojciech Ratyński – prezes FSNT-NOT w rozmowie z Ryszardem Kaczorowskim – Prezydentem II RP

nych w Unii Europejskiej, podniesienia za granicą statusu osób wykształconych w Polsce oraz tematowi stworzenia możliwości partnerstwa z organizacjami krajowymi i stowarzyszeniami zawodowymi na świecie.