

ZASTOSOWANIE ANALIZY NUMERYCZNEJ DO OCENY NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W STALOWYCH ELEMENTACH ROZJAZDÓW KOLEJOWYCH

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Metoda Elementów Skończonych
3. Istota naprężeń własnych
4. Modele numeryczne elementów rozjazdów kolejowych
5. Wyniki obliczeń numerycznych
6. Podsumowanie

STRESZCZENIE

Naprężenia własne są często uważane za jedną z przyczyn przyspieszania rozwoju uszkodzeń w elementach rozjazdów kolejowych i mniejszej wytrzymałości zmęczeniowej szyn i stalowych części rozjazdów. W pracy przedstawiono przegląd prac wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych MES do oceny stanu naprężeń oraz podano przykładowe rozkłady naprężeń własnych, uzyskane drogą symulacji komputerowej.

1. WPROWADZENIE

Rozwój technik informatycznych i komputerowych w ostatnich dekadach XX w. spowodował również pojawienie się coraz lepszych i bardziej funkcjonalnych aplikacji komputerowych, wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych MES. W chwili obecnej metoda ta jest jedną z najszerzej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Jej uniwersalność, polegająca na łatwości schematycznego przedstawiania różnych obszarów o skomplikowanej geometrii, kwalifikuje ją jako dobre narzędzie do modelowania problemów związanych zarówno z transportem kolejowym, jak i z innymi dziedzinami techniki. Badania doświadczalne są dosyć kosztowne

i często muszą być ograniczone do niezbędnego zakresu; natomiast użycie programów wykorzystujących MES umożliwia wykonywanie różnych wariantów testów symulacyjnych. Porównanie wyników symulacyjnych i doświadczalnych umożliwia modyfikację wyidealizowanych założeń oraz warunków brzegowych, przyjętych w modelach numerycznych.

2. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

2.1. Uwagi ogólne

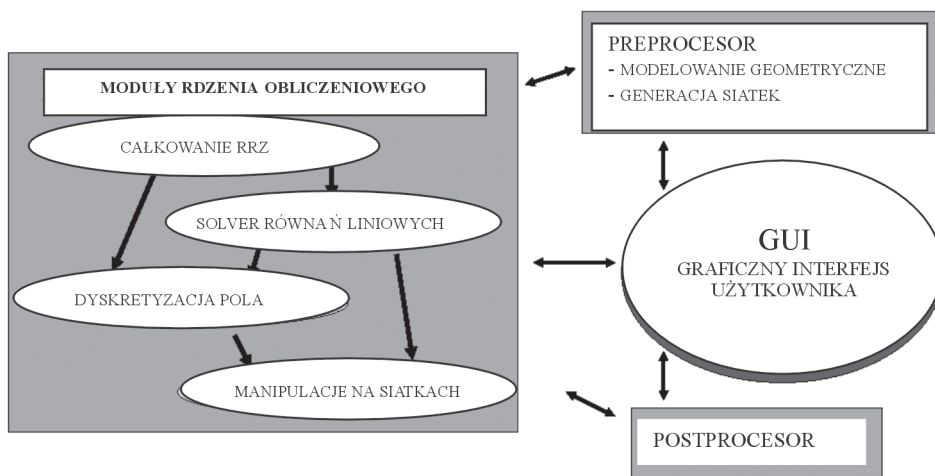
Metoda Elementów Skończonych (MES, ang. FEM, *finite-element method*) jest zaawansowaną matematycznie metodą obliczeń, wykorzystującą podział obszaru (najczęściej powierzchni lub przestrzeni) na skończone elementy uśredniające stan fizyczny ciała i przeprowadzaniu obliczeń tylko dla węzłów tego podziału.

MES jest stosowana do rozwiązywania zadań fizyki. Jest to więc określony ciąg operacji wykonywanych przez inżyniera projektanta i komputer, w celu poszukiwania rozwiązania, począwszy od sformułowania zadania, a skończywszy na graficznej interpretacji wyników obliczeń.

Do podstawowych elementów metody rozwiązywania danego problemu z wykorzystaniem MES można zaliczyć:

- sformułowanie zagadnienia różniczkowego,
- podział obszaru obliczeniowego na elementy,
- przyjęcie w obszarze prostych funkcji bazowych jako podstawy aproksymacji.

Zestawy programów komputerowych dla metody elementów skończonych składają się zazwyczaj z trzech części (rys.1):



Rys. 1. Środowisko obliczeń MES [2]

- 1) preprocesora, w którym jest definiowana geometria i własności badanego modelu;
- 2) procesora, nazywanego też *solverem*, wykonującego obliczenia (na macierzach);
- 3) postprocesora, służącego do graficznej prezentacji uzyskanych wyników.

Podział ten jest dość dogodny dla producentów i użytkowników, bowiem często kto inny specjalizuje się w tworzeniu modułu obliczającego, a kto inny w tworzeniu interfejsu użytkownika; umożliwia również korzystanie z wielu różnych zestawień programów, na przykład preprocesora i postprocesora.

Istnieje wiele profesjonalnych programów dla MES. Do najbardziej znanych programów służących do obliczeń numerycznych i modelowania bryłowego, wykorzystujących MES, można zaliczyć: ANSYS, MSC/Fatigue, MSC/Nastran + MSC/Patran, ABAQUS, LS-Dyna i inne.

2.2. Historia programów wykorzystujących MES

Historia programów opartych na Metodzie Elementów Skończonych zaczyna się w końcu lat pięćdziesiątych i początku lat sześćdziesiątych XX wieku, kiedy to *Ed Wilson* upowszechnił swoje wczesne programy, opracowane na uniwersytecie w Berkeley. Pierwszym takim programem był NONSAP; program ten powstał na bazie programu SAP (*Structural Analysis Program*), opracowanego w Berkeley. Pierwszy komercyjny program MARC, oparty na nieliniowej MES, został opracowany w 1968 r.

Pod koniec lat sześćdziesiątych *John Swanson*, pracując w *Westinghouse Electric Company*, rozwinął nieliniowy program MES dla zastosowań związanych z technologią nuklearną. Po opuszczeniu firmy *Westinghouse* wprowadził na rynek program ANSYS, który przez wiele lat dominował na rynku nieliniowych programów MES [3, 11].

W 1969 r. *Ted Belytschko* opracował, na zlecenie Sił Powietrznych USA, program nazwany SAMSON, oparty na obliczaniu sił węzłowych bez użycia macierzy sztywności, który wykonywał obliczenia tylko w dwóch wymiarach i był używany przez dekadę do zastosowań militarnych w USA. W 1972 r. program ten został zmodyfikowany; nowa wersja, nazwana WRECKER, umożliwiała obliczenia nieliniowe w trzech wymiarach. Program był sponsorowany przez Departament Transportu (U.S. DOT), do 1975 r.

Lata siedemdziesiąte to opracowanie przez *Davida Hibbitta* programu ABAQUS i przez *Klausa-Jürgena Bathe* programu o nazwie ADINA.

W 1976 r. ukazała się pierwsza wersja kodu *Johna Hallquista* o nazwie DYNA (*Lawrence Livermore National Laboratories*). DYNA-2D i DYNA-3D zostały szeroko rozpowszechnione na uniwersytetach i ośrodkach badawczych na całym świecie.

Okolo 1990 r. komercyjne programy MES obejmowały głównie statykę i metody *implicit*¹ dla dynamiki. Nową gałęzią współczesnych programów nieliniowych stały się programy typu *explicit*², oparte na algorytmie tzw. jawnego całkowania równań ruchu. Pierwsze programy *explicit* były inspirowane przez prace prowadzone w laboratoriach Departamentu Energii (DOE) i przez tzw. „hydro-kody”, oparte na podejściu *Eulerowskim* [3].

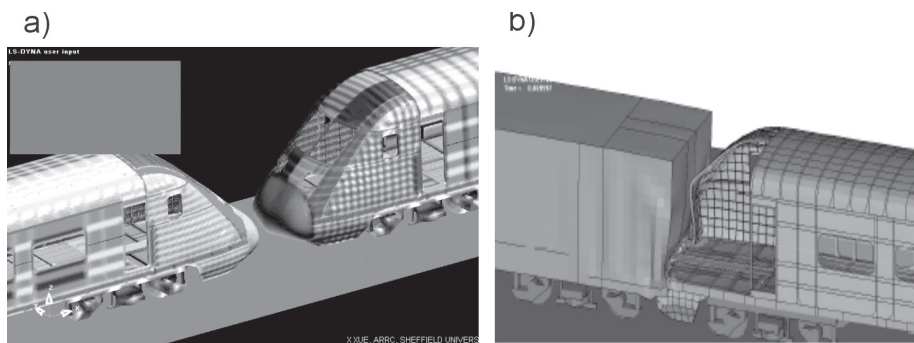
Programy typu *explicit* w chwili obecnej mają szerokie zastosowanie w wielu gałęziach transportu, głównie transportu samochodowego, lotniczego i coraz częściej – w transporcie kolejowym.

¹ Metoda budowy globalnej macierzy sztywności.

² Metoda kolejnych kroków dla rozwiązania układu równań różniczkowych.

2.3. Przykłady zastosowań

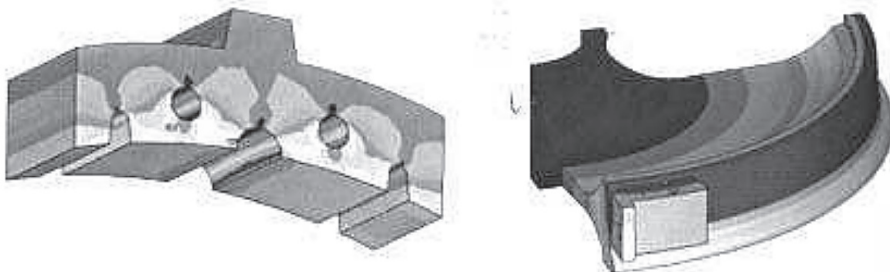
Za pomocą programów wykorzystujących metody MES bada się w mechanice komputerowej (CAE) wytrzymałość konstrukcji, symuluje odkształcenia, naprężenia, przemieszczenia, przepływ ciepła, przepływ cieczy itp. Bada się też dynamikę, kinematykę i statykę maszyn. Zastosowanie metod numerycznych w chwili obecnej jest coraz większe niemal we wszystkich gałęziach transportu. Programy MES wykorzystuje intensywnie branża samochodowa i lotnicza. Transport kolejowy również zaczął sięgać po tego typu narzędzia, czego przykładem jest symulacja zderzeń pociągów (rys. 2).



Rys. 2. Zderzenie dwóch pociągów [24]
a) czołowe, b) najeżdżenie na pociąg

Symulacje komputerowe, zarówno zderzeń pociągów (*crash-test*), jak i tramwajów, były poddawane weryfikacji w trakcie badań poligonowych w skali 1:1, wykonywanych w Żmigrodzie przez CNTK [15]. Badania te pod nazwą *Safetrain* i *Safetram* były sponsorowane przez Unię Europejską w ramach europejskich programów badawczych. Celem tych badań była weryfikacja prototypów kabin pojazdów – za pomocą zamodelowania numerycznego – w stosunku do przyjętych miar bezpieczeństwa oraz przeprowadzenie testów wykonanych na prototypach w skali 1:1. Zostały zdefiniowane również strefy konstrukcji nośnych pojazdów przewidywane do zgniotu; są to przestrzenie, które powinny być chronione, gdyż znajdują się tam pasażerowie lub prowadzący pojazd.

Innym przykładem zastosowania metod numerycznych w transporcie kolejowym może być symulacja zjawisk cieplnych, zachodzących w trakcie hamowania pojazdu szynowego. Można symulować różne przypadki hamowania, zachowania się wstawek hamulcowych (rys. 3), rozkła-



Rys. 3. Rozkład temperatur we wstawce hamulcowej oraz rozkład temperatur w układzie koło – wstawka hamulcowa [18]

du naprężeń, jak też temperatur na powierzchni tocznej kół czy też tarcz hamulcowych [17, 18]. W pracy [18] zostały przedstawione wyniki modelowania zjawisk mechanicznych i termicznych zachodzących w układzie koło – klocek hamulcowy, w trakcie hamowania pociągu.

Wykorzystanie modeli numerycznych umożliwia optymalizację konstrukcji wstawek hamulcowych, a tym samym – zmniejszenie gęstości strumienia ciepła obciążającego koło pojazdu szynowego.

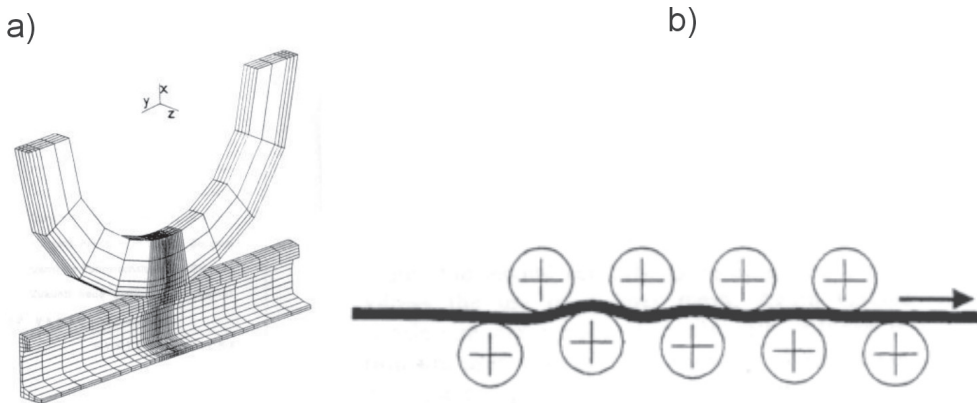
Modelowanie numeryczne kół obciążonych pozwala na odwzorowanie przepływu ciepła podczas procesu hamowania ciągłego (np. symulacja zjazdu z Przełęczy Św. Gotharda). Umożliwia to sprawdzenie nacisków i naprężeń na styku koła bieżącego i obręczy; zmniejszenie nacisków i naprężeń może powodować obłuzowanie się obręczy [8,17]. Wykorzystywanie MES do projektowania zestawów kołowych tarcz hamulcowych umożliwia optymalizację obciążeń eksploatacyjnych kół kolejowych i zestawów kołowych [6].

2.4. Wykorzystanie MES w badaniach elementów nawierzchni kolejowej

Metody numeryczne są wykorzystywane w kolejnictwie już od kilkunastu lat. Intensywne prace prowadzono między innymi na Politechnice Warszawskiej, Politechnice Krakowskiej i w innych ośrodkach naukowo-badawczych za granicą [4, 5, 10, 12, 14, 20, 21, 22, 23, 25].

Jedną z prac autora dotyczy analizy naprężeń własnych w elementach stalowych rozjazdów, tj. w szynach i kształtownikach iglicowych [9]. Głównym celem obliczeń numerycznych było wyznaczenie naprężeń własnych pozostających w szynie po odciążeniu (zakończeniu zginania) oraz określenie wpływu różnych parametrów na wielkość tych naprężeń i ich rozkład w materiale. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami pomiarów naprężeń wykonanych techniką ultradźwiękową.

Prace zagranicznych naukowców dotyczą, między innymi, modelowania zjawisk powstających w wyniku walcowania szyn na prostownicach rolkowych. W pracy [15] został przedstawiony model szyny, służący do określenia wpływu procesu walcowania na wielkość i rozkład naprężeń w ocenianym obiekcie (rys. 4).

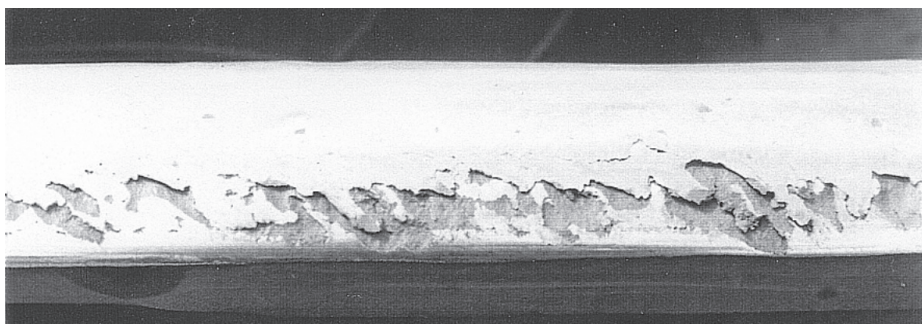


Rys. 4. Badanie procesu walcowania szyn
a) przykład modelu zastosowanego do badań, b) schemat prostownicy rolkowej szyn [16]

3. ISTOTA NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH

Zjawisko powstawania naprężeń własnych w elementach rozjazdów kolejowych, jak też próby ograniczenia ich wartości w procesie produkcji oraz w trakcie eksploatacji, interesują zarówno producentów, jak i instytucje badawcze.

Stalowe elementy nawierzchni i rozjazdów kolejowych – szyny, krzyżownice i iglice – są poddawane w eksploatacji zmiennemu obciążeniu dynamicznym, a w wyniku bezpośredniego oddziaływania kół – naprężeniom kontaktowym, przekraczającym pierwotną granicę plastyczności materiału. Zjawisko to powoduje – oprócz pionowego i bocznego zużycia – pojawianie się uszkodzeń powierzchniowych w postaci pęknięć, wykruszeń i złuszczeń (rys. 5).

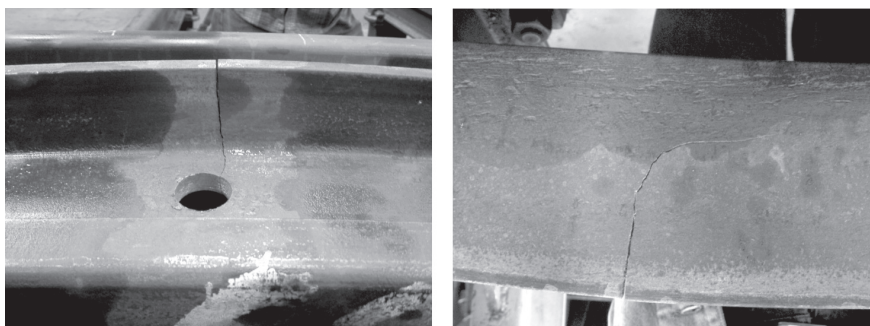


Rys. 5. Przykład uszkodzeń powierzchni tocznej szyny

Naprężenia te wskutek relaksacji mogą powodować zmianę kształtu odlewów i odkuwek, a w eksploatacji prowadzić do postaciowych odkształceń iglic rozjazdowych. Tego rodzaju przypadki obserwowano na kolejach DB i RENFE w rozjazdach układanych na liniach dużych prędkości [19].

W procesie produkcji szyn i stalowych elementów rozjazdów operacje związane z ich produkcją powodują zmiany poziomu i rozkładu naprężeń

Podczas procesu technologicznego naprężenia własne pojawiają się zarówno w wyniku gięcia kształtowników stalowych, jak i podczas hartowania powierzchniowego, któremu są poddawane powierzchnie toczne. Niewłaściwie przeprowadzenie tych operacji (rys. 6) może powodować



Rys. 6. Pęknięcie szyny skrzydłowej podczas gięcia

niekorzystny przyrost i rozkład naprężeń, które dodatkowo, po zsumowaniu się z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych, mogą stanowić zagrożenie bezpieczeństwa ruchu kolejowego.

Zjawisko tworzenia się naprężeń własnych w przypadku obróbki cieplnej i hartowania jest bardziej złożone niż przy niejednorodnym odkształceniu na zimno. Mają tu znaczenie gradienty temperatury i wynikające z nich naprężenia termiczne, a także procesy przemian fazowych, rekrytalizacji, relaksacji naprężeń i zależności własności materiału od temperatury.

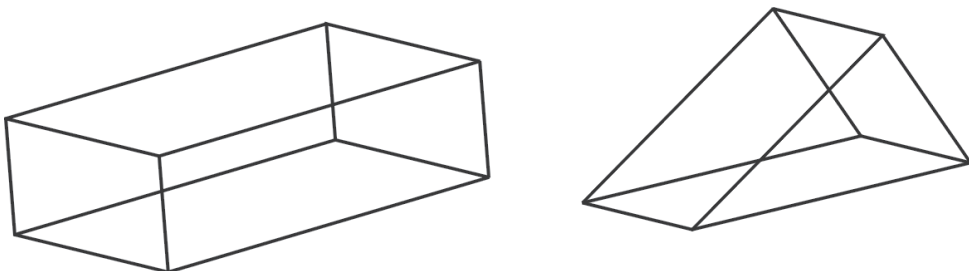
4. MODELE NUMERYCZNE ELEMENTÓW ROZJAZDÓW KOLEJOWYCH

4.1. Uwagi wstępne

Obliczenia numeryczne zostały wykonane dla zbudowanych, trójwymiarowych modeli szyny skrzydłowej i kształtownika iglicowego. Opracowane modele numeryczne szyny UIC60 i I60 posłużyły do obliczeń naprężeń własnych, powstających i pozostających w szynie po odciążeniu (po zakończeniu zginania trzypunktowego, jak i po zakończeniu hartowania – po ostudzeniu) oraz do określenia wpływu różnych parametrów na wielkość tych naprężeń i ich rozkład w materiale.

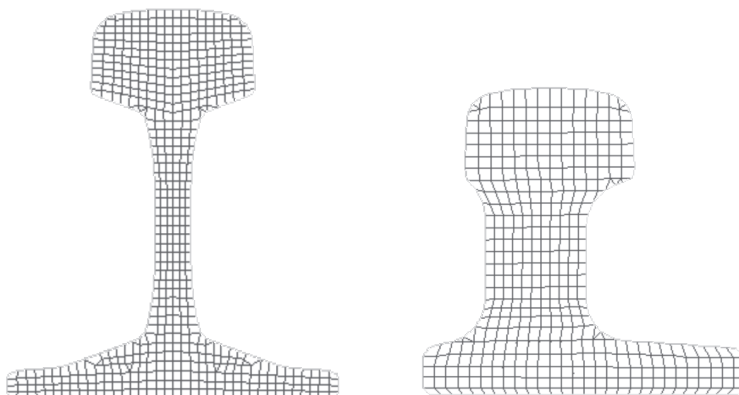
4.2. Geometria – siatka elementów skończonych

Geometria modelu numerycznego jest zdefiniowana w postaci siatki węzłów określających położenie i wielkość elementów skończonych. Wybierane są elementy trójwymiarowe, bryłowe, na podstawie analizy wymiarów obiektów. Ze względu na skomplikowany kształt modelowanych obiektów, oprócz elementów prostopadłościennych, zawierających sześć ścian, wprowadzone zostały dodatkowo elementy trójwymiarowe, bryłowe prostopadłościenne o podstawie trójkątnej (zawierające pięć ścian); wybrane elementy są przedstawione na rysunku 7.



Rys. 7. Zastosowane elementy bryłowe

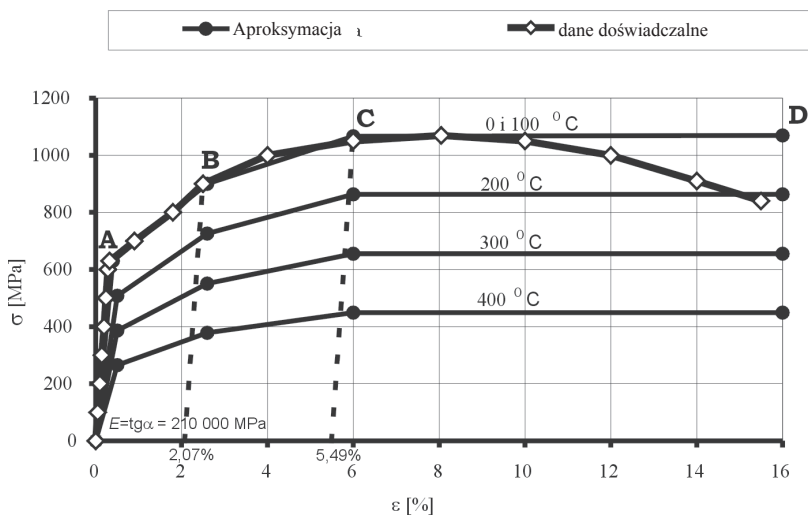
Elementy kwadratowe są uważane za bardziej odpowiednie do opisu zagadnień, w których dominuje zginanie. Lepiej opisują koncentracje naprężeń, umożliwiają lepszą aproksymację zakrzywionych kształtów, przy mniejszej liczbie elementów. Na rysunku 8 przedstawiono przekrój i widok modelu szyny UIC60 i kształtownika iglicowego I60 z naniesioną siatką



Rys.8. Przekrój modelu szyny UIC60 i kształtownika iglicowego I60 z naniesioną siatką

4.3. Model materiału

Na rysunku 9 została przedstawiona charakterystyka otrzymana drogą doświadczalną dla jednoosiowej próby rozciągania stali (linia ciągła). Przyjęto moduł *Younga* $E = 210\,000$ MPa oraz współczynnik *Poissona* $\nu = 0,3$ [9, 12, 13].



Rys. 9. Doświadczalna i teoretyczna krzywa zależności $\sigma - \epsilon$ dla osiowego rozciągania stali w zależności od temperatury nagrzewania [12, 13]

Dla potrzeb obliczeń numerycznych określono przybliżone krzywe zależności naprężenia σ od odkształcenia ϵ , uzależnione od temperatury nagrzewania, (linia łamana $0-A-B-C-D$). Punkt A zdefiniowano jako umowną granicę plastyczności $R_{0,2} = 629,7$ MPa. Na krzywej aproksymacyjnej (linia łamana) punkt A rozgranicza stan sprężysty od stanu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem. Następny punkt B jest obrany na krzywoliniowym odcinku wzmocnienia, dla naprężenia $\sigma_B = 900,0$ MPa. Punkt C jest wyznaczony przez maksymalne naprężenie osiągnięte w czasie próby, czyli wytrzymałość doraźną $R_m = 1069,0$ MPa. Dla poszczególnych temperatur określono wartości odkształceń i naprężeń.

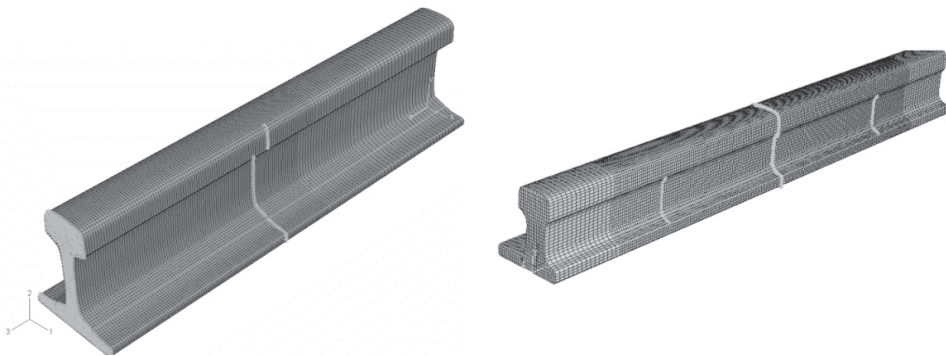
4.4. Obciążenie i warunki podparcia

Sposób podparcia i obciążenia, w trakcie eksperymentu, został w modelu numerycznym zastąpiony przez wyidealizowane warunki brzegowe.

Proces obliczeniowy został podzielony na dwa kroki:

- 1) w przypadku gięcia pierwszy krok odpowiadający obciążeniu (gięcie) i drugi odpowiadający odciążeniu;
- 2) w przypadku hartowania powierzchniowego pierwszy odpowiadający nagrzaniu i drugi odpowiadający ostudzeniu.

Warunki podparcia są w modelu określone przez odebranie odpowiednich stopni swobody, uniemożliwiających szynie przemieszczanie się w kierunku pionowym i poprzecznym; szyna może się przemieszczać w kierunku podłużnym ze względu na rozszerzalność materiału, w wyniku nagrzewania powierzchni tocznej. Jako najbardziej odpowiednie do symulacji podparcia wybrano węzły, występujące w przekrojach podparcia (rys. 10).



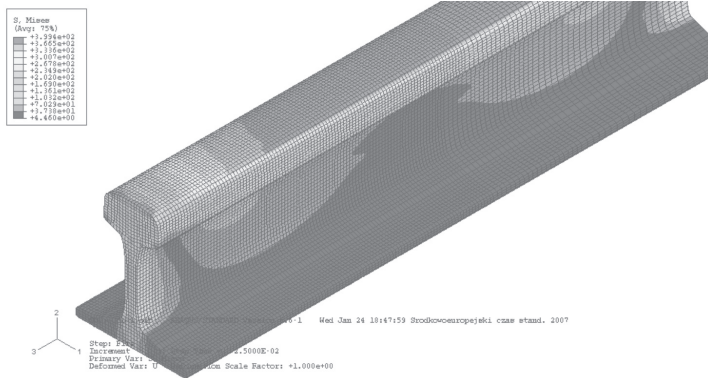
Rys.10. Warunki brzegowe i obciążenie dla szyny UIC60 i I60 giętej w trzech punktach

Wymienione warunki brzegowe, symulujące podparcie, pozostają niezmiennymi w całym procesie obliczeniowym, czyli w obydwu krokach obciążenia.

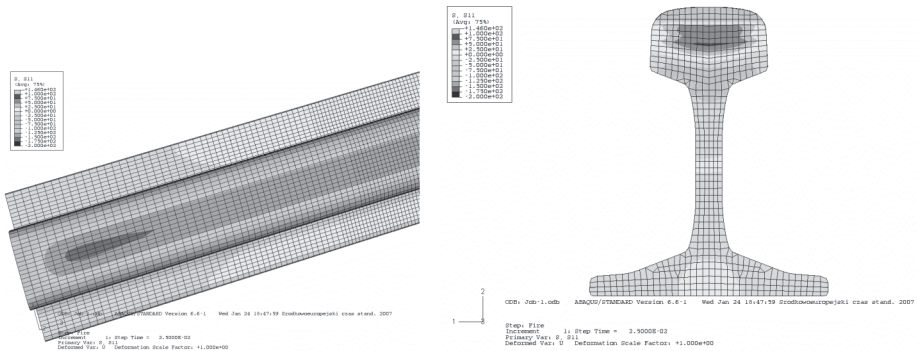
Warunki brzegowe powinny w maksymalny sposób aproksymować warunki podparcia i obciążenia występujące w trakcie eksperymentu.

5. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Wyniki obliczeń numerycznych, otrzymane z wykorzystaniem modeli szyny UIC60 i I60, są przedstawione na rysunkach obrazujących kontury naprężenia zastępczego *Hubera–Misessa*, jak też naprężenia własne na końcu procesu hartowania (po ostudzeniu) i gięcia trzypunktowego. Wyniki obliczeń numerycznych przedstawione są na rysunkach 11÷15.

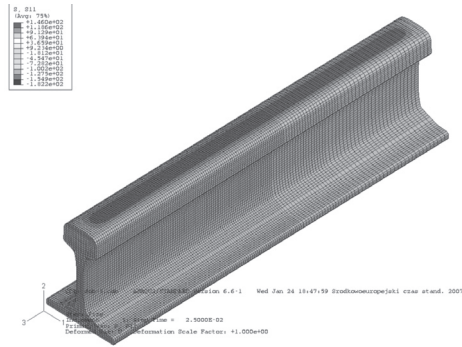


Rys.11. Kontury naprężenia zastępczego σ^{HM} na końcu procesu hartowania płomieniowego uzyskane dla modelu połowy szyny UIC60. Widok całej szyny

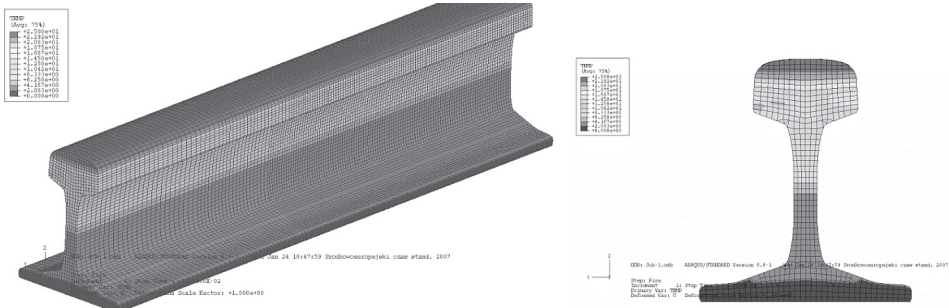


Rys.12. Kontury naprężenia σ_{11} (naprężenia własne) po hartowaniu uzyskane dla modelu połowy szyny UIC60. Widok główki i przekroju szyny

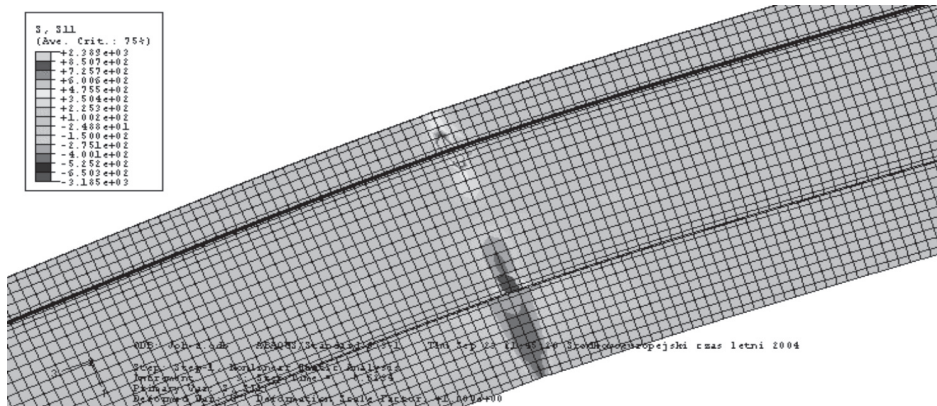
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że największe naprężenia własne w wyniku gięcia występują w stopce, w obszarach najbardziej oddalonych od płaszczyzny symetrii. Z kolei naprężenia własne powstałe po symulacji hartowania powierzchniowego są naprężeniami ściskającymi i występują w obszarze powierzchni



Rys.13. Kontury naprężenia σ_{11} (naprężenia własne) po hartowaniu uzyskane dla modelu połowy szyny UIC60. Widok odcinka szyny



Rys. 14. Kontury temperatur w szynie po zakończeniu symulacji hartowania powierzchniowego. Widok odcinka szyny i jej przekrój



Rys. 15. Kontury naprężenia σ_{11} (naprężenia własne) na końcu procesu obciążenia uzyskane dla modelu kształtownika iglicowego I60. Widok główki szyny

tocznej główki szyny. Charakter tych naprężeń związany jest z tworzeniem się w materiale struktury drobnoperlitycznej w wyniku przemian fazowych po obróbce cieplnej. Tak powstała struktura i rozkład naprężeń są korzystne, bowiem mogą zapobiegać mikropęknięciom, a także opóźniać proces korozji. Rozkład naprężeń własnych w szynie komplikuje złożoność kształtu jej przekroju normalnego. Z tego względu, przy analizie rozkładów naprężeń wewnątrz szyny, jest konieczne uwzględnienie modeli trójwymiarowych. Przystępując do obliczeń numerycznych, przyjęto założenie, że szyna w stanie wyjściowym jest pozbawiona naprężeń własnych.

Opracowane modele numeryczne kształtowników stalowych UIC60 i I60 umożliwiły przeprowadzenie symulacji komputerowej procesu poprzecznego gięcia w zakresie niesprężystym, jak też symulację obróbki cieplnej (hartowania powierzchniowego).

Obliczenia numeryczne dostarczyły wiele interesujących informacji, m.in. otrzymano dane o wielkości i rozkładzie naprężeń własnych, o stanie odkształcenia podczas hartowania i gięcia trójpunktowego. Na podstawie tych wyników można określić miejsca występowania ekstremalnych wartości naprężeń na obwodzie analizowanego obiektu.

Obciążenie w trakcie symulacji komputerowej realizowano w postaci wymuszonego przemieszczenia, zadanego we wszystkich węzłach leżących w wybranych przekrojach normalnych. Proces gięcia próbki został przedstawiony w dwóch krokach: obciążenia i odciążenia; był dzielony na przyrosty automatycznie przez program lub też w sposób narzucony przez użytkownika.

Definiując model materiałowy, wykorzystano dostępny w programie model dla metali, uwzględniający właściwości sprężyste i plastyczne ze wzmocnieniem. W modelu wykorzystano również wyniki jednoosiowych prób rozciągania próbek, wykonanych ze stali, z której wyprodukowano badane szyny.

6. PODSUMOWANIE

Badania symulacyjne dostarczają nam informacje dotyczące rozkładów naprężeń i odkształceń, zarówno na powierzchni jak i wewnątrz rozpatrywanych elementów. Możliwa jest łatwa zmiana warunków brzegowych, co w połączeniu z badaniami eksperymentalnymi stanowi efektywną metodę analizy rozważanego zagadnienia.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że jest możliwe na drodze analizy numerycznej, dzięki wykorzystaniu metody elementów skończonych, otrzymanie dużej liczby informacji dotyczących rozkładu naprężeń i odkształceń zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz rozpatrywanych elementów. Łatwa zmiana warunków zadania umożliwia analizę parametryczną, która doprowadza do wniosków optymalizacyjnych. Sprzężenie obliczeń numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych z badaniami eksperymentalnymi może stanowić najbardziej efektywną metodę analizy rozpatrywanego zagadnienia.

Możliwość zastosowania symulacji komputerowej w połączeniu z metodą ultradźwiękową pomiaru naprężeń może być interesującym rozwiązaniem w diagnozowaniu naprężeń własnych w trakcie procesu produkcyjnego. Umożliwi to łatwiejszą kontrolę wielkości naprężeń własnych w badanych kształtownikach, optymalizując tym samym proces produkcyjny.

BIBLIOGRAFIA

1. ABAQUS – Standard User’s Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Version 6.6.
2. *Banaś K.*: Metoda elementów skończonych. Seminarium BIT CM UJ 17.05.2006 r. Politechnika Krakowska, Instytut Modelowania Komputerowego.
3. *Belytschko T., Liu W. K., Moran B.*: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons, LTD, Chichester, England, 2000.
4. *Bijak – Żochowski M., Marek P.*: Residual stress in some elasto-plastic problem of rolling contact with friction. PII:S0020-7403(96)00018-5 Pergamon Elsevier Science S.A. 1996 r.
5. *Bogdański S., Olzak M., Stupnicki J.*: Numerical stress analysis of rail rolling contact fatigue cracks. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, nr 27 s. 89–100.
6. *Donzella G., Scepi M., Solazzi L., Trombini F.*: The effect of block braking on the residual stress state of a solid railway wheel. Proc Instn Mech Engrs Vol 212 Part F.
7. *Guerrier W., Weiser J., Schmedders H., Dannenberg R.*: Ursachen von Schienen-eigen-
spannungen infolge Rollruchten und Beitrag zur Verriingerung. ETR 1997, nr 10.
8. *Handkiewicz J.*: Numeryczne wyznaczenie wybranych zjawisk termiczno-mechanicz-
nych w kole obręczowanym. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki War-
szawskiej, 2006, nr 1 (60).
9. *Kukulski J.*: Diagnozowanie stanu naprężeń własnych w elementach rozjazdów kole-
jowych metodą ultradźwiękową. Praca doktorska, Gdańsk 2005.
10. *Kukulski J.*: Ocena stanu naprężeń własnych w elementach nawierzchni kolejowej.
Materiały Konferencyjne Pojazdy Szynowe. Kazimierz Dolny nad Wisłą 13-15.09.2006.
11. *Kwaśniewski L.*: Komputerowe systemy analizy konstrukcji. Wykład. Politechnika
Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 2004.
12. Opracowanie systemu diagnozowania, pomiaru i oceny naprężeń własnych w rozjaz-
dach kolejowych w procesie ich produkcji. Projekt badawczy KBN nr 9T12C 08999C
wykonany pod kierunkiem *Deputata J. i Towpika K.*, Warszawa 2001.
13. PN-EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules
– Structural fire design.
14. *Orkisz J., Magiera J., Karmowski W.*: Reconstruction of residual stresses in railroad
from measurements made on vertical and oblique slices. *Wear* 191 (1996) p.78–89.
15. *Sanecki H.*: Metodyka przygotowywania pojazdów testowych do wysokoenergetycz-
nych badań zderzeniowych kabin pojazdów szynowych. Zeszyty Naukowe Instytutu
Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 2006, nr 2 (61).
16. *Schleinzner G., Fischer F.D.*: Residual stresses in new rails. *Materials Science & Engi-
neering A288* (2000). Elsevier Science S.A.
17. *Sitarz M., Chruzik K., John A.*: Analiza numeryczna wytrzymałości zmęczeniowej kół
kolejowych. Materiały Konferencyjne Pojazdy Szynowe. Kazimierz Dolny nad Wisłą,
13–15.09.2006.
18. *Sitarz M., Mańka A., Helka A.*: Modelowanie zjawisk mechanicznych i termicznych
w układzie koło – klocek hamulcowy. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechni-
ki Warszawskiej, 2006, nr 2 (61).
19. *Towpik K.*: Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni. Biblio-
teka Problemów Eksploatacji, Warszawa – Radom 2006.
20. *Towpik K.*: Investigations of residual stress in switch blades. 3rd International Confe-
rence „Railway Engineering”, London 2000.
21. *Towpik K., Kwaśniewski L., Kowalczyk P.*: Experimental and numerical analysis of

- residual stress in switch blades. Archives of Civil Engineering. L, 2, Wydawnictwo PAN 2004.
22. *Towpik K., Kwaśniewski L., Kowalczyk P.:* A finite element analysis of residual stress in switch blades produced by transverse bending. Międzynarodowa Konferencja „Railway Engineering, 2001”, Londyn 2001.
 23. *Wang Y., Shen X., Chiang F-P.:* New experimental approach for studying residual stress in rails. *Wear* 191 (1996) p. 90–94 Elsevier Science S.A.
 24. *Xiangdong Xue:* Modelling collisions of rail vehicles with deformable objects A report produced for Rail Safety and Standards Board.
 25. *X.X. Yu a, W.S. Lau:* A finite-element analysis of residual stress in stretch grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, nr 94, s. 13–22.