

Prof. Janusz Badur

IMP PAN Gdańsk

ADMINISTRACJA
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki
Wpłynęło dnia... 04.05.2020
Nr... 517... szt. 2

WPR
Prof. dr hab. inż. A.M. Amiel
BARDZO POKOJ
SPRAWY
DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechniki Krakowskiej
dr hab. inż. Stanisław M. Rybicki, prof. PK

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Łukasza Felkowskiego pt.

Metody oceny stanu cieplno-wytrzymałościowego elementów kotła energetycznego

1. Informacje

Recenzowana rozprawa wykonywana była w latach 2015-2020 w Katedrze Energetyki Wydziału Inżynierii i Energetyki, Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie – Czyżynach. Promotorem pracy był prof. Piotr Duda. Praca zawiera się na 138 stronach przy czym sedno rozprawy zawierają:

rozdział 4 - modele analityczne wielkogabarytowe, modele 0D, modele 2D płyt ortotropowych, modele pełzania, modele czasu zniszczenia, własne eksperymenty pełzaniowe dotyczące dwóch stali, kalibracja, pomiary *in situ*, przygotowanie danych do modelu 3D)

rozdział 5 - obliczenia modelami 0D, 1D, 2D, 3D+time elementów krytycznych kotła i analizy ich zagrożeń.

Pozostałe rozdziały, wśród których zwraca uwagę wyczerpująca bibliografia i dodatek zawierający procedurę obliczeniową pełzania, są tu mniej ważne.

Niezwykle krótki jest **rozdział zawierający cele i zakres**, nie mniej recenzent nie ma żadnych wątpliwości co do celu, tezy i zakresu rozprawy. Wszystkie te trzy elementy są bowiem oryginalne w skali światowej, są na tyle pionierskie iż, na przykład, nie jest możliwością podanie zakresu pracy – mamy tu bowiem pierwsze, dziewicze, kroki w nowym polu jakim jest tak całościowo rozumiana ocena pracy kotła. Dopiero inni

badacze którzy przyjdą po Panu Felkowskim, będą rozszerzać lub zawężać zakres wytyczonych przez niego prac. Od razu trzeba podkreślić to co budzi entuzjazm recenzenta, iż owo „wytyczenie” to nie tylko olbrzymia intuicja i talent badawczy doktoranta [a po części i jego promotora], ale „duch inżynierii” i „praktyki”, który unosi się nad wszystkimi poczynaniami rozprawy. Jeśli bowiem, jakiś czytelnik rozpoczyna studiowanie podrozdziału i nie jest w nim *explicite* napisane po co on jest, to możemy być pewni, iż akurat tego podrozdziału wymaga projektowa sztuka inżynierska oraz sztuka eksploatacyjna i remontowa. Mam czasami wrażenie, iż pisząc jakiś rozdział jego autor świeżo wrócił z inspekcji kotła i jeszcze ma spracowane i pobrudzone dłonie. Może przypomnę, iż termodynamikę z zabrudzonych hal fabrycznych wyprowadzili na intelektualne salony około 1850 roku dwaj wielcy pionierzy: William Rankine (majster na budowie dróg żelaznych) i Ferdinand Reech (maszynista na francuskich okrętach parowych). Ten sam duch pionierizmu przenika rozprawę mgr. Felkowskiego.

2. Ważność i aktualność podejmowanej tematyki

Z naszych doświadczeń wynika, iż sens uprawiania nauki występuje wtedy gdy możliwa jest jej aplikacja w technice i w ogólnie rozumianej cywilizacji. Bowiem badamy materiały, tworzymy ich modele konstytutywne i modele obliczeniowe, wszystko z myślą o aplikacjach w energetyce. Ale mamy dwa poziomy naszego modelowania. Pierwszy, wynikający z potrzeb projektowania coraz bardziej wytrzymałych, sprawnych i długowiecznych urządzeń – ten poziom potrzeb - jest podstawowy, jest on przedmiotem akademickiej nauki i nowoczesnego przygotowania absolwenta. W sensie praktycznym, nauka wspiera sztukę projektowania i konstruowania, uprawianą dziś w międzynarodowych koncernach.

Ale jest jeszcze poziom drugi, wyższy, krajowy, gdzie nie sięgają koncerny międzynarodowe i międzynarodowy biznes - jest to potrzeba wyżej wykształconych specjalistów zajmujących się eksploatacją, monitoringiem, remontem i modernizacją urządzeń a w końcu również ich diagnostyką a w tym badaniami eksperckimi chroniącymi je przed chronicznymi awariami. Ten wielki rynek pracy, nie może być obsługiwany przez zachodnich specjalistów z Niemiec i Wielkiej Brytanii, musimy kształcić w tym kierunku własne kadry, musimy również podejmować takie dedykowane tematy badacze, jakie są przedmiotem rozprawy.

Reasumując, rozprawa Pana inż. Felkowskiego podejmuje temat aktualny, będący swego rodzaju wyzwaniem stojącym przed energetyką w całości - a działem kotłów w szczególności.

3. Teza rozprawy

Powstała ona pod naciskiem wyzwań praktycznych, z analizy praktycznego stanu rzeczy, ze stwierdzenia autora, iż oto mamy do dyspozycji zwykłą graciarnię narzędzi badawczych. Może i w innych branżach takich jak turbiny parowe i gazowe nie jest tak źle, może w branży samochodów wyścigowych formuły 1 jest lepiej, ale w kotłach, jako dziedzinie nauk technicznych mamy pewien wyraźny brak narzędzi komputerowych projektowania. Przykładowo, w koncernach turbinowych potrafimy dać w rozsądnym czasie dwóch dni odpowiedź na pytanie: które z elementów konstrukcji będą najbardziej narażone gdy uruchomimy (lub odstawimy) urządzenie w ciągu pół godziny (na takie rozruchy była przygotowana turbina 1000 MW w El. Ostrołęka C). W koncernach kotłowych, które nie są przygotowane na tego typu wyzwania współczesności, prawdopodobnie dalej uważa się, że start kotła musi potrwać kilka dni.

Pytamy się więc, od strony merytorycznej, o narzędzia badawcze w należyтым porządku: o ile **BOT-y turbinowe**, mają w sobie wmontowane zaawansowane modele 3D, wszystkie modele pełzania wysokotemperaturowego, niskocyklowego zmęczenie, nowoczesne hipotezy wyężenia termicznego i zmęczenia termicznego, nowoczesne sposoby zliczania czasu zużycia i ewolucji pęknięć, to czy w podobnym stanie znajdują się **BOT-y kotłowe**?

Teza rozprawy Pana Felkowskiego bierze się z niebywale odważnej i twórczej odpowiedzi na to samo pytanie: czy mamy w dyspozycji sprawdzone, pewne, inżyniersko proste, narzędzia badawcze służące do praktycznej diagnostyki, monitoringu eksploatacyjnego, prognozowania zagrożeń, zużycia, remontów i modernizacji kotłów energetycznych? Odpowiedz Pana Felkowskiego, na tak precyzyjne postawione pytanie, jak antycypujemy, jest negatywna, bowiem - i tu stawia on tezę - nie mamy jeszcze w literaturze naukowej kotłów, koncepcji redukcji skal zagadnienia, tak aby w sposób spójny, dokładniejszy, rachunkowo krótszy i wygodniejszy używać „**konglomeratu modeli numerycznych 0D, 1D, 2D, 3D, 3D+time, często wspieranych rozwiązaniami analitycznymi**”.

Mówiąc więc językiem metaforycznym, Doktorant ma ambicje: „ogarnąć całość”. Aby tego dokonać stawia sobie cel praktyczny dokonania redukcji zagadnienia – od całości kotła do jego elementu krytycznego - tak by było ono rozwiązywane przy pomocy współczesnych narzędzi obliczeniowych i normowych. Aby to było możliwe, w tej wielkiej graciarni dostępnych nam modeli trzeba „dobudować” brakujące elementy, trzeba dosztukować nagle przerwane myśli i sposoby rozumowania, trzeba wprowadzić pomosty między wiedzą normową a wiedzą obliczeniową, trzeba nowych

eksperymentów pomiarowych, które są konieczne aby zakłajstrować dotychczasowe wyrwy w naszych rozumowaniach, trzeba wypracować schematy postępowania między modelami 0,1,2,3D tak aby uzyskiwać wiarygodne redukcje wymiarów i dane częściowe z tym związane. Tak więc teza doktoratu - to wyśmienity program badawczy godny Katedry Energetyki WIŚ i E PK.

Z tego też płynie również wspaniała lekcja dla nas wszystkich – nie trzeba bowiem zmyślać też akademicko pięknych i doskonale idealnych, trzeba po prostu podejmować szczerze wyzwania jakie stoją przed krajową energetyką.

4. Rozdział czwarty – prace analityczne i eksperymentalne

- 4.1. Na początku omawia się zagadnienie kluczowe – zawieszenie kotła na konstrukcji wsporczej i metody wyznaczenia sił w wieszakach. Klasycznej metodzie w której kocioł traktuje się jak zawieszoną bryłę sztywną doktorant przeciwstawia metodę w której ściany mają skończoną sztywność i są podatne na sposób zawieszania.
- 4.2. Aby ten drugi sposób zrealizować trzeba wyznaczyć sztywności zastępcze ścian membranowych kotła co czyni się zastępując rury membran ortotropowymi ale ciągłymi własnościami materiału płyty - jest to osobny problem rozważany przez Doktoranta metodami wariacyjnymi, otrzymuje on różne moduły Younga i różne stałe Poissona w dwóch głównych dla kotła kierunkach. Następnie przechodzi do ustalenia równań ortotropowych płyt, podobnych do tych jakie wyprowadził w swojej rozprawie habilitacyjnej Huber. Własne implementacje modelu Doktorant poddaje weryfikacji przez porównanie z modelem 3D – dostępnym komercyjnie.
- 4.3. W pod-rozdziale 4.3 Doktorant omawia zagadnienie pełzania wysokotemperaturowego, poprzez wskazanie stosowanych równań konstytutywnych dla wszystkich trzech obszarów pełzania. Koncentruje się na modelu Garofalo oraz na dokładniejszym opisie etapu III-go. Pokazuje jak wprowadzić opracowaną przez siebie funkcję pełzania do kodu komercyjnego a następnie w 4.3.7. przystępuje do omówienia praktycznych sposobów wyznaczania czasu żywotności pełzaniowej. Koncentruje się na sposobie Monkmana-Granta (brak jednorodności wymiarowej) i Larsona-Millera. W podrozdziale 4.3.9 przedstawia wyniki własnych prób laboratoryjnych pełzania wykonanych dla stali austenitycznej 304 i stali martenzytycznej P91. Uzyskuje wyjątkowo cenne wykresy pozwalające wyznaczyć stałe konstytutywne modeli pełzania (rys. 4.27). Implementacje tych stałych sprawdza na wykresie globalnym 4.29., który sam w sobie jest cennym wkładem do nauki o pełzaniu. Na rysunku 4.31 pokazuje wyliczone i

pomierzone krytyczne odkształcenia pełzania w trzecim stanie pełzania, pewne obawy może budzić fakt, iż wielkości modelowane wydają się być niedoszacowane w stosunku do pomiarowych – czy jest to więc ocena z niedomiarem bezpieczeństwa ?

5. Rozdział piąty – prace obliczeniowe

- 5.1. Doktorant prezentuje zagadnienie obliczania zawiesia ścian kotła - mamy tu prezentację rozkładu sił w prętach zawiesia oraz realny przykład awarii, który dostarcza motywacji do podjęcia badań. Unikalny rysunek 5.1. przedstawia jak duża może być rozbieżność między siłami w prętach przyjętymi w klasycznej procedurze projektowej a rzeczywistymi wartościami pomierzonymi przez doktoranta (osobiście !) – różnice są kilkukrotne, od strony niebezpiecznej, bowiem siły zostały niedoszacowane w projektowaniu. Inny rysunek pokazuje taki przykładowy rozkład sił w zawiesiach po 15 latach pracy. Widać, że sprawa jest poważna. Większość rysunków ma wysoką oryginalność – nawet podobnych nie widziałem w literaturze.
- 5.2. Przed wykonaniem obliczeń właściwej konstrukcji Doktorant wykonuje test opracowanej przez siebie płyty ze sztywnością zastępczą i porównuje z, chyba pełnym, modelem 3D, który nazywa „modelem rzeczywistym”. Rozpatruje trzy sposoby obciążenia: zginanie płyty ciśnieniem, rozciąganie płyty w kierunku zgodnym z osią ortotropii i poprzecznym do niej. Ugięcie takiej płyty pod wpływem ciśnienia jest mniej interesujące – ciśnienia spalin nie są tak wysokie jak w turbinie gazowej – bardziej ważny jest przypadek z siłą. Szkoda iż, nie opisano go szczegółowiej - siła, wbrew rysunkowi 5.11, nie była zaczepiona punktowo, chociaż wartość np. $F = 0.2[\text{MN}]$ sugeruje punktowe przyłożenie (przynajmniej w modelu zastępczym !). Pojawia się jako wynik wielkość u_2 czy było to przemieszczenie pod siłą ?. W modelu rzeczywistym przyłożenie siły chyba powinno być bardziej realistycznie zamodelowane. Podpisy pod rysunkami nie mówią czego kolorowe mapy dotyczą.
- 5.3. W tym podpunkcie doktorant przedstawia szczegóły procedury opracowanego modelu i założenia obciążeń konstrukcji i schematów jej podparcia – przekonując czytelnika jak trudne jest jednoczesne obliczanie zawiesi i ścian kotła na nich wiszących. Posługuje się tu kolokwializmem: „rozkład sił w prętach można zweryfikować za pomocą MES” - co miało oznaczać „rozkład sił w prętach można zweryfikować za pomocą modeli w pełni trójwymiarowych” - skrót „MES” jest żargonem wziętym z hali fabrycznej, i oznacza dość prymitywną metodę dyskretyzacji zadania ciągłego

– jeśli zadanie będzie 1D to i MES będzie 1D, stąd krytykuję milczące założenie doktoranta iż MES może nam służyć jako „model rzeczywisty” – rzeczywistość to coś o co możemy pobrudzić ręce.

Kontrowersyjny jest zwrot „bandaże zapewniają sztywność ścianom, na które działa ciśnienie spalin” – zasięgnąłem w tej sprawie opinii znanego gdańskiego kotlarza, wydaje się że bandaże dodaje się z innych powodów konstrukcyjnych, np. stateczności podłużnej ściany pod wpływem własnego albo cudzego ciężaru. Ponieważ jest to kocioł fluidalny, może też wchodzić w rachubę zasypanie ścian węglem zmieszany z piaskiem, co mogło by dawać ciśnienia o kilka rzędów większe niż ciśnienie spalin.

Rys 5.12 jest idealnym rysunkiem do prezentacji konferencyjnej z dużej odległości – jednak nie jest to rysunek publikacyjny ponieważ litery opisujące są zbyt duże – tego błędu nie ma np. rysunek 5.1 czy 5.9, który ma dobrane litery – druk a prezentacja są to dwie różne sprawy. Pojawia się tu litera R nazwana reakcją - niestety budzi to złe podejrzenie recenzenta, iż jest to ta sama wielkość co siła F w przykładzie testowym. Nie takiej redukcji złożoności recenzent się spodziewał [przynajmniej podobnej do tej które dokonywał w turbinach]

Jest w punkcie 5.3. niezwykle szczerą dyskusję założeń - założenia, przypomnijmy, to sztuka upraszczania rzeczywistości. Dlatego dyskusje między inwestorem a wykonawcą głównie dotyczą założeń. Wśród założeń brak jest, zdaniem recenzenta przypadku ciężaru wody w rurach lub ciężaru pary jeśli mowa o przegrzewaczach. Brak jest też sił dynamicznych biorących się z przepływu pary mokrej typu dławienie lub młot parowy.

Nie przekonuje model autora oparty o program komercyjny – doktorant używa nazw typu SOLID186 które, są nazwami rynkowymi a nie naukowymi. Prawdziwi twórcy tego elementu inaczej się nazywają.

Nie mniej osiągnięto wynik w postaci porównania sił w prętach wieszaka za pomocą metody tradycyjnej (bez uwzględniania sztywności ścian) i metody obliczeniowej będącej kompozycją elementów 3D, 0D i 1D. Różnice sięgają do 22 % i niepotrzebnie są nazywane przez autora „błędem”. Akurat, jeśli chodzi o wiarygodność recenzent ufa bardziej tradycyjnej metodzie, wskazanej też przez normę (rys. 5.17). Ważne jest że w tradycyjna metoda daje nadmiar siły czyli jest po stronie bezpiecznej.

- 5.4. Przykład w podpunkcie 5.4. dotyczy analizy sytuacji w której jedno z zawiesi jest zbyt napięte i niejako przejmuje na siebie obciążenie sąsiadów. Model oddaje wiele szczegółów konstrukcyjnych min. pokazuje jak żebra dospawane są do wyginających się rur płetwowych. Doktorant zdecydował się na użycie uproszczeń w modelowaniu (element płytowy) i temu poświęcona jest znaczna część jego wysiłków. Mimo tych uproszczeń osiąga podział

konstrukcji na horrendalną ilość około pół miliona elementów. Nie może się to podobać żadnemu recenzentowi - bowiem jest tu zawarta „filozofia”, iż utrzyma się lepszą fizykę przez zagęszczenie siatek. Podobnie podejście stosowane jest w metodzie DNS w płynach gdzie sądzi się, iż na gęstych siatkach wychwyci się zjawisko turbulencji.

Cenna jest analiza Doktoranta zastanawiająca się nad wybraniem najsłabszego ogniwa (miejsca) w konstrukcji – winien to być element łatwo dostępny do wymiany i szybki do wymiany.

Interesująca jest również analiza kilkukrotnie większego naciągu zawiesia i możliwość jego pracy w stanie plastycznym. Rysunek 5.30 jest chyba najlepszym wynikiem całej rozprawy – ma w sobie oryginalność zasługującą na najlepsze czasopisma. Autor zastanawia się jakie mają być wymiary, dopuszcza nie tylko deformacje plastyczne pręta ale i całej ściany w okolicy zamocowania (rys 5.32) – szkoda, iż nie przetestowano możliwości wykorzystania zjawiska shake-down (adaptacji plastycznej układu). Jednak wyznaczono maksymalną siłę przy której pojawiają się pierwsze odkształcenia plastyczne. Ten punkt kończą cenne informacje praktyczne dla projektantów.

- 5.5. Za następny element krytyczny Autor uznaje kolektor podgrzewacza który ma 12 cm grubości i „podziurawiony” jest ośmioma rurami wężownic. Wykonany jest ze stali P91 dla której wcześniej Doktorant opracował stałe modelu pełzania. Że jest to trudny element do zaprojektowania widzimy z analizy norm na ten temat – jest to swoista droga przez „mękę uproszczeń” i „ekstremalnych założeń” – toteż celem dodatkowym Doktoranta jest chyba również krytyczna ocena tej gmatwaniny myśli projektowej. Kolektor znajduje się pod niebagatelnym ciśnieniem 28.4 MPa w temperaturze 559 stopni C.

Nie jest zrozumiałe dlaczego normy rozpatrują warunek Tresci, który należy do hipotez naprężeniowych dedykowanych materiałom kruchym i mało-spójnym. W naszym Zakładzie wolimy bardziej sprawną hipotezę Burzyńskiego, albo Gursona-Bieleckiego dedykowaną przewężeniom kolanek na rurociągach. Zmniejszenie średnicy walca von Misesa ma chyba inne cele – może chodzi o redystrybucję naprężeń obwodowych powodowanych pełzaniem.

Autor numerycznie prześledził pełzanie do 200 000 godzin eksploatacji – ale chyba nie do końca przedstawił co się w konstrukcji dzieje. Pojawiają się bowiem trwałe odkształcenia, które są powodem stopniowej redystrybucji naprężeń i ich zmiany w trakcie pełzania (przy stałym ciśnieniu i temperaturze pary). Niestety na rys 5.40 z uwagi na zmianę skali, trudno jest odczytać poziom tej redystrybucji – oraz najważniejsze jak po grubości przesunęła się oś obojętna. Mimo tych i innych uwag krytycznych trzeba podkreślić, iż jest to pierwsze rozwiązanie w literaturze tego typu.

5.6. Następnym elementem krytycznym jest trójkąt również wykonany ze stali P91. Autor sprawdza obliczenia projektowe i znajduje miejsca gdzie naprężenia są większe od obliczonych normowo. Pokazuje również rozwiązanie z uplastycznieniem materiału do którego dochodzi na konstrukcyjnej krawędzi – więc w miejscu niegroźnym dla spawu.

Ważna jest symulacja próby pełzania trójkąta w trakcie 200 000 godzin i idąca za tym analiza maksymalnego czasu pracy (żywotności pełzaniowej) uzyskana przez dopasowanie współczynnika Larsona-Millera. Opracowane wzory 5.12 i 5.13 widzę pierwszy raz w literaturze – mają dużą wartość użyteczną, zaś krzywa na rys 5.54 zwykle uzyskiwana jest tylko eksperymentalnie - jej numeryczne utworzenie świadczy o dużym kunszcie autora.

5.7. Osobnym studium Doktoranta jest analiza pełzania w przegrzewaczach pary. Zaczyna je od: „Wyzwaniem XXI wieku jest dostarczanie energii elektrycznej po przystępnych cenach ...” Cieszy mnie takie zdrowe stanowisko gdyż sądziłem od dawna, że: „wyzwaniem jest dostarczanie energii zielonej”, która, tak jak w przypadku energetyki wiatrowej, jest dwa, dwa i pół razy droższa. Tak więc kryterium „przystępnych cen” brzmi optymistycznie i swojsko. Dobrze, że jest na świecie jedno takie miasto – Kraków – gdzie kryterium „przystępnych cen” jest wciąż zasadnym

Podziwiać trzeba jasne wprowadzenie do tematu, widać iż Doktorant zna ten element kotła i rozumie jego zawartość. Celem Doktoranta jest sprawdzenie działania dwóch kodów komercyjnych (które z gruntu rzeczy nie mają nic wspólnego z nauką). Oczywiście wyniki są mało wiarygodne i stanowić mogą jedynie pewne przesłanki do oceny pracy podgrzewaczy.

Ciekawy jest rysunek własny Doktoranta nr 5.60 pokazujący opracowany przez niego wcześniej diagram jednowymiarowego pełzania stali 304H z symulacjami numerycznymi w których dominują również stany jednowymiarowe. Jest to pewnego rodzaju porównanie modelu z eksperymentem, świadczące o tym iż Doktorant ma jednak pewien dystans do kodów komercyjnych i nie wierzy im za nadto.

Interesująca jest analiza redystrybucji naprężeń w trakcie pełzania również w kontekście udziału naprężeń termicznych. Wnioski Autora wskazują, że potrzebne są jeszcze uzupełniające symulacje przed postawieniem wniosków projektowych.

5.8. Następny punkt dotyczy tego samego lecz w kontekście wpływu różnych sposobów utwierdzenia rur przegrzewaczy. Nie tyle chodzi o różną konstrukcję ale różne przybliżenia numeryczne tej samej konstrukcji i uwzględnienia nieznanymi sił naciągu rur wieszakowych. W wyniku obliczeń Doktorant dochodzi do oczekiwanego wniosku, że zmniejszenia koncentracji

naprężeń można uzyskać regulacją naciągu prętów wieszakowych. W tym kontekście oryginalna jest jego dyskusja niedokładności montażowych i ich wpływie na żywotność węzownic. Ma ona swe głębsze źródła w jednej z awarii jaka miała miejsce w roku 2018. Strony 110-116 czyta się z wypiekami na twarzy – autor pokazuje tu swój talent badawczy – poszukiwanie przyczyn awarii i stawianie tez co do ich usunięcia to swoiste śledztwo kryminalne i błędzenie w gąszczu faktów i przesłanek. Autor, podkreślmy z całym przekonaniem, nie tylko wskazuje iż tez jego rozprawy ma pewien potencjał utylitarny, przeciwnie, autor wykorzystuje go na rzeczywistej konstrukcji w sytuacji rzeczywistej potrzeby. Jest to więc sytuacja wzorcowa dla nauk technicznych.

- 5.9. W tym punkcie Doktorant przedstawia studium pracy podgrzewacza wtórnego pary i wykazuje iż przyczyną innej awarii może być nieprawidłowy montaż węzownicy podgrzewacza wtórnego i jego zawieszenie. Nie bez pewnego talentu dydaktycznego autor przedstawia ten element kotła, widać dbałość prezentacji o to aby szczegóły pozostawały w logicznym związku z pracą całości urządzenia. Takie zrównoważone ujęcie to wyraz dojrzałości badawczej.

Również w modelu widać przejście od całości do szczegółu – pozwala w miejscu awarii przyjąć lokalny model 3D w właściwych warunkami brzegowymi i właściwymi obciążeniami. Model 3D przedstawiają rysunki 5.88 i 5.89. Autor stawia tezę, iż przyczyna awarii tkwiła w pełzaniu tak, że w wyniku redystrybucji naprężeń w czasie, jedne elementy ulegały odciążeniu a inne jak miejsce awarii, dociążeniu i większemu wysiłowi. A ponieważ nasze hasło: „wytężyć tak aby wytrzymać” obejmuje również pełzanie, to doszło do przekroczenia poziomu odkształceń wskazujących na trzeci etap pełzania – który zwykle kończy się zerwaniem.

Autor proponuje modernizację schematu pracy poprzez regulację sił w zawiesiach. Nie kładzie przypuszczeń co do wielkości naciągu lecz numerycznie dobiera go tak aby krytyczny element znajdował się na stabilnej części krzywej „odkształcenie pełzania - czas”, tzn. w II stadium.

6. Ocena rozprawy

Z obfitości wątków i przypadków rozpatrywanych w rozprawie wnioskować należy, iż mgr Łukasz Felkowski jest świadomy nowości podejmowanego przez siebie tematu i pragnie oddać tezę rozprawy w możliwie bogaty i kompletny sposób. Proponowany przez niego sposób redukcji zagadnienia: „od ogółu do elementu krytycznego” jest poprawną naukowo i sprawdzoną praktycznie tezą rozprawy. Aby uzyskać sprawność operacyjną swego podejścia – pokazaną na dziewięciu niezależnych przykładach w

rozdziale piątym, wcześniej, w rozdziale czwartym dokonuje On uzupełnień w podstawach teoretycznych swych modeli a w szczególności sztywności zastępczej ścian oraz modeli pełzania stali stosowanych w kotłach. W tym ostatnim przypadku Doktorant wykonuje również eksperyment laboratoryjny pełzania trwający 15 tys. godzin.

Doktorant wykazał się unikalnym talentem badawczym, pokazał swą wiedzę teoretyczną o modelowaniu 2D, oraz wiedzę o pełzaniu wysoko-temperaturowym i jego modelach i związaną z tym wiedzę o ocenę żywotności pełzaniowej. Wykazał umiejętność prowadzenia badań eksperymentalnych i pomiarów *In situ*. Ale przede wszystkim, pokazał się jako wyróżniający mechanik-obliczeniowiec z niezwykłą swobodą posługujący się modelami: 0D, 1D, 2D, 3D, 3D+time, potrafiący również uzupełniać modele o własne procedury.

Dodatkowo, należy niezwykle wysoko ocenić wiedzę kotłową Doktoranta, zna on budowę konstrukcję i pracę eksploatacyjną kotła na tak wnikliwym poziomie jak gdyby przez wiele lat pracował bezpośrednio w jego projektowaniu i eksploatacji. Jest to unikalna cecha badaczy, nawet tych pracujących w naukach technicznych.

7. Wniosek

Sądzę iż, doktorant Pan Łukasz Felkowski spełnił wymagania stawiane w przepisach o stopniach i tytułach z widocznym nadmiarem, dlatego wnoszę do Rady Naukowej WIŚ i E PK o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Mając na względzie fakt, iż mgr Felkowski rozwiązał wyjątkowo trudne i pionierskie zagadnienie, o wielkiej użyteczności, uzupełniając i testując potrzebne narzędzia badawcze o dużym ładunku nowoczesności, wnoszę również o wyróżnienie jego rozprawy.