

NUMERYCZNE MODELOWANIE ROBOCZYCH CYKLI KONSTRUKCJI W WARUNKACH KOROZYJNYCH

Waldemar DUDDA

Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, UWM w Olsztynie
ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn, dudda@uwm.edu.pl

Streszczenie

Opracowanie dotyczy analitycznych i numerycznych narzędzi deterministycznej oceny zachowania się konstrukcji pracujących w ekstremalnych warunkach, znajdujących się pod wpływem wieloparametrowych i/lub cyklicznych obciążeń mechanicznych, termicznych i chemicznych. Poszczególne elementy konstrukcji ulegają plastycznej i korozyjnej degradacji oraz dysypują energię, na którą składają się wkłady od nieodwracalnych zjawisk typu praca na odkształceniach niesprężystych. Trwałość konstrukcji i jej elementów oceniana jest za pomocą kryterium energetycznego. W pracy główny nacisk został położony na zamodelowanie i numeryczne zaimplementowanie zjawisk degradacyjnych, takich jak cykliczna plastyczność, wywołana obciążeniami mechanicznymi i termicznymi, korozja naprężeniowa, korozja elektrochemiczna i korozja niskocykliczna.

Słowa kluczowe: obciążenie cykliczne, degradacja korozyjna, kryterium energetyczne

NUMERICAL MODELING OF CONSTRUCTION WORK CYCLES UNDER CORROSION DEGRADATION

Summary

Supplement of analytical and numerical tools of deterministic evaluation of working structure behavior in extreme conditions, which are under multiparameter and/or cyclic mechanical, thermal and chemical loads, is the aim of the dissertation. Particular structure units go under plastic and corrosion degradation and they dissipate energy, which consists of irreversible effect contributions, like a work on the inelastic strains. The structure and its units' lifetime is estimated according to energy criterion. Dissertation emphasizes the modeling and numerical implementation of degradation effects, such as cyclic plasticity, generated by mechanical and thermal loads, stress corrosion, electrochemical corrosion and low-cyclic corrosion.

Keywords: cyclic load, corrosion degradation

1. WPROWADZENIE

Eksploatacja urządzeń przemysłowych prowadzi do przekroczenia stanów sprężystych, na które konstrukcje są projektowane, i pojawienia się różnych form degradacji materiału nośnego, wśród których plastyczność, pełzanie, termiczne zmęczenie i korozja są najniebezpieczniejsze. W pracy rozważa się możliwość oceny zachowania się konstrukcji z wykorzystaniem numerycznego modelowania cykli eksploatacyjnych [1, 2]. Tego typu badania rozwijają nową dziedzinę zwaną „kombinowany shakedown” rozszerzoną o mody degradacji materiału typu korozja (naprężeniowa, elektrochemiczna, niskocykliczna) i zniszczenie. Nowoczesny przemysł stawia wymóg wysokiej dyspozycyjności urządzeń oraz żąda określenia dla nich wiarygodnych prognoz odnośnie dalszej eksploatacji, stąd porównywanie wyników uzyskanych w trakcie diagnostyki urządzeń z danymi otrzymanymi z numerycznych symulacji

cykli roboczych może mieć duże znaczenie praktyczne zwłaszcza tam, gdzie nie istnieją probabilistyczne sposoby szacowania trwałości resztkowej.

Nadzór Techniczny stawia pytania o ile obniżyć poziom obciążenia, aby urządzenie mogło bezpiecznie przepracować do czasu dekapitalizacji albo jak długo urządzenie czy konstrukcja może jeszcze pracować, mimo że jego elementy uległy wyżej wymienianej eksploatacyjnej degradacji. Odpowiedź na tego rodzaju pytanie nie może być dana wyłącznie na podstawie statystycznych szacunków teorii niezawodności, bowiem musi uwzględniać specyficzne zagrożenia konkretnej konstrukcji posiadającej własną historię eksploatacji. Jednakże wykorzystując aktualne dane diagnostyczne do symulacji kolejnych cykli roboczych, można wysuwać coraz to wiarygodniejsze prognozy odnośnie dalszej eksploatacji.

2. MODELE DEGRADACJI KOROZYJNEJ

Korozja zachodząca na powierzchni elementu konstrukcji prowadzi w efekcie do zmniejszenia powierzchni nośnej elementu – proces ten złożony z cyklicznym termomechanicznym obciążaniem konstrukcji w zakresie plastycznym może powodować wielokrotnie większą degradację aniżeli prosta suma wpływów korozji i plastyczności. W pracy analizuje się trzy postaci korozji [3]:

- korozję naprężeniową:

$$\dot{d}_{SC} = C_{SC} |\sigma_{eff} - \sigma_{gr}|^n e^{(T-T_0)/B} \quad (1)$$

- korozję elektrochemiczną i gazową wysoko-temperaturową

$$\dot{d}_{HC} = \hat{C}_{HC} (T/T_0)^\kappa |\nabla T|^m \quad (2)$$

- nisko-cykliczne zmęczenie korozyjne

$$\dot{d}_{LC} = C_{LC} N^\mu (\Delta \varepsilon_{eff})^b e^{(T-T_0)/B_1} \quad (3)$$

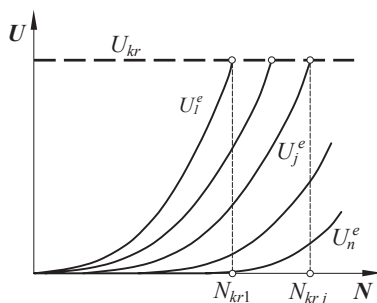
W powyższych wzorach d oznacza ubytek grubości w [mm], T temperaturę, N ilość cykli, $\Delta \varepsilon_{eff}$ zakres intensywności naprężeń, σ_{gr} naprężenie graniczne, poniżej którego nie występuje korozja naprężeniowa, $\Delta \varepsilon_{eff}$ zakres intensywności odkształceń, zaś C_{SC} , n , B , C_{HC} , κ , m , C_{LC} , μ , b , B_1 są stałymi modelu kalibrowanymi na jednowymiarowych eksperymentach. Ostateczny ubytek grubości oblicza się jako sumę $d = d_{SC} + d_{HC} + d_{LC}$.

3. ENERGETYCZNE KRYTERIUM DEGRADACJI KONSTRUKCJI

Podstawę kryterium energetycznego stanowi jednostkowa energia nieodwracalnie rozproszona (dysypowana) w materiale w czasie zmiennego obciążenia aż do zniszczenia elementu. Energię dysypowaną przez element w trakcie cyklicznych zmian obciążenia opisano następującą zależnością

$$U^e = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{k \cdot N} \Delta W_i \quad (4)$$

gdzie ΔW_i jest przyrostem pracy naprężeń na odkształceniach plastycznych odpowiadającym i -temu przyrostowi obciążenia, N liczą cykli zmian obciążenia, k ilością przyrostów obciążenia w cyklu, V objętością elementu.



Rys. 1. Energia krytyczna, krytyczne liczby cykli

Kryterium energetyczne określa, iż element ulega zniszczeniu w chwili, gdy energia jednostkowa dysypowana w tym elemencie osiągnie wartość energii krytycznej U_{kr} (rys. 1). Stąd warunek zniszczenia j -tego elementu można zapisać następująco

$$U_{kr} - U_j^e = 0 \quad (5)$$

Odpowiadająca temu warunkowi liczba cykli N_{krj} oznacza liczbę cykli do zniszczenia j -tego elementu. Dysponując okresami T_i poszczególnych cykli, można również określić czas t_{krj} do zniszczenia j -tego elementu. Energię krytyczną przyjęto za równoważną właściwej granicznej energii U odkształcenia przy statycznym rozciąganiu [4].

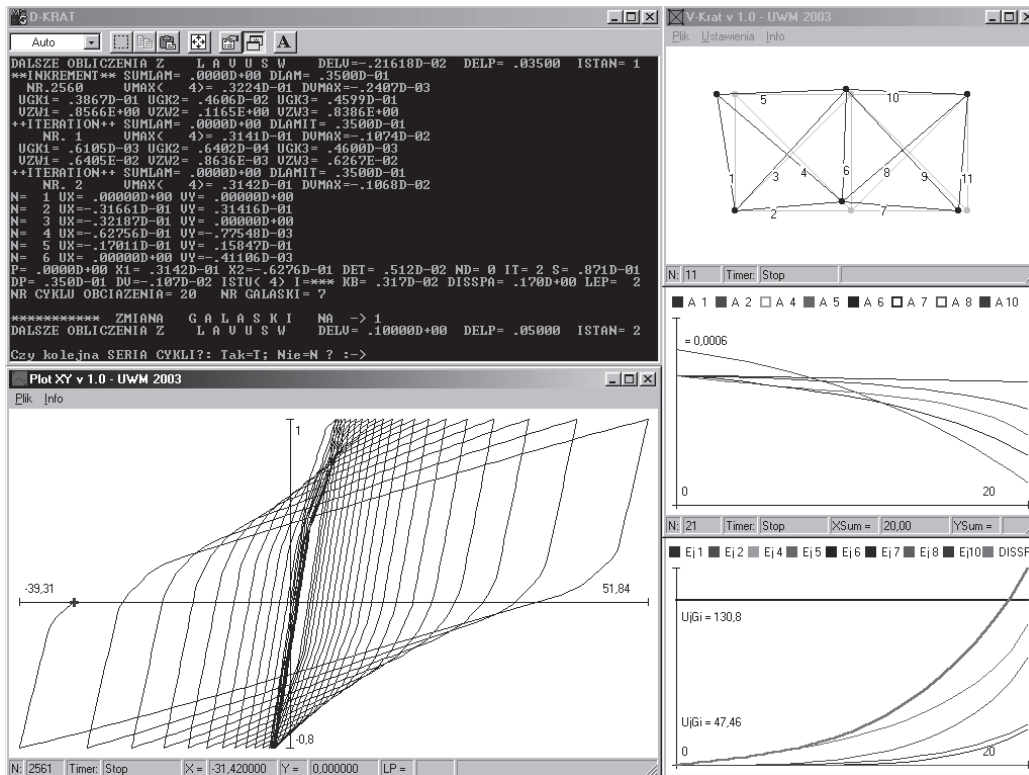
Inną wielkością mogącą charakteryzować stan konstrukcji, jest całkowita ilość energii nieodwracalnie w niej rozproszonej. Dla konstrukcji składających się z n elementów (np. konstrukcje kratowe) globalną określono jako sumę energii poszczególnych jej elementów:

$$U^C = \sum_{i=1}^{k \cdot N} \sum_{j=1}^n \Delta W_{ij} \quad (6)$$

Powyższy zapis nie oznacza tu wielkości tensorowej, a W_{ij} oznacza przyrost pracy naprężeń na odkształceniach plastycznych j -tego elementu, odpowiadający i -temu przyrostowi obciążenia. Jeżeli możliwa jest redystrybucja obciążenia, przenieszonego przez ulegający degradacji element, na pozostałe elementy konstrukcji, to zniszczenie tego elementu nie musi oznaczać utraty trwałości konstrukcji w sensie globalnym. Może to prowadzić do szybszej utraty nośności pozostałych elementów lub do uzdrowienia konstrukcji jako całości. Znane są przypadki, gdzie elementy (np. odlewane lub po obróbce cieplnej) pękały przy niewielkim obciążeniu zewnętrznym w miejscach kumulacji naprężeń własnych, a po „rozładowaniu” spiętrzenia naprężeń pęknięcie nie powiększało się, nawet podczas dalszej normalnej eksploatacji. Stąd globalne kryterium energetyczne sprowadza się do obserwacji przyrostu energii dysypowanej przez konstrukcję z cyklu na cykl, a to z kolei pozwala ocenić wrażliwość konstrukcji na program obciążeń.

4. APLIKACJE NUMERYCZNE

Kod numeryczny D-KRAT został zbudowany na bazie biblioteki Mini-Mod zawierającej procedury solwera MES, opracowanej przez *Chróścielewskiego* i *Branickiego* [5]. W kodzie tym zaimplementowano opracowane modele zjawisk fizycznych takich jak korozja naprężeniowa, elektrochemiczna, gazowa oraz korozyjne zużycie niskocykliczne. Ponadto dołączono moduł, pozwalający uwzględnić wpływ obciążenia termicznego na własności fizyczne i mechaniczne materiału oraz wyznaczający odkształcenia termiczne. Wprowadzono również model cyklicznego umocnienia/osłabienia materiału. Zamodelowane tu zjawiska są na ogół nieliniowe, stąd w zakresie śledzenia nieliniowych ścieżek



Rys. 2. Śledzenie ścieżki równowagi, dysypacji energii, degradacji przekrojów poszczególnych elementów i odkształceń konstrukcji w trakcie cyklicznych zmian obciążenia

obciążenia, używana jest technika numeryczna opracowana przez *Chróścielewskiego* [6]. W trakcie symulacji numerycznej cyklicznego obciążenia konstrukcji mamy możliwość pełnego śledzenia ścieżki równowagi, odkształceń konstrukcji, rozkładu energii dysypowanej i degradacji czynnego przekroju dla poszczególnych jej elementów (rys. 2).

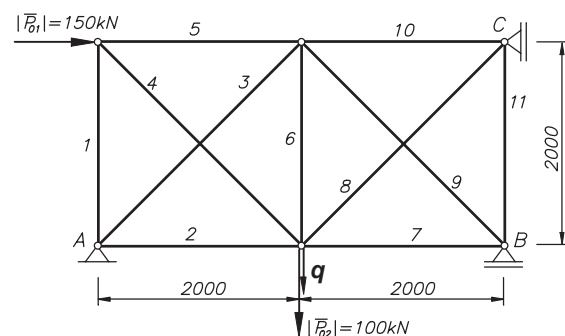
4. WPLYW KOROZJI NA SZYBKOŚĆ DEGRADACJI

Niniejsza część pracy ma na celu określenie liczby cykli zmian obciążenia konstrukcji do momentu uszkodzenia jednego z jej elementów w zależności od stopnia agresywności środowiska korozyjnego. Zgodnie z podanym kryterium energetycznym (5), za moment wystąpienia uszkodzenia przyjęto cykl, w którym jednostkowa energia dysypowana przez dowolny element konstrukcji przekroczy wartość graniczną określoną zależnością *Broniewskiego* [7]

$$U = 0,0025(3R_m + R_e) A_{10} \quad (7)$$

Jako model konstrukcji przyjęto jedenastoelementową kratownicę przedstawioną na rys. 4 [8]. Pola przekroju poprzecznego elementów: pręt nr 2 – 6 cm²; pręt nr 11 – 4 cm²; pozostałe pręty – 5 cm². Założono stałe materiałowe: $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, $E_T = 1 \cdot 10^4$ MPa, $R_e = 200$ MPa, $R_m = 500$ MPa. Konstrukcje poddano cyklicznemu obciążeniu jedno-parametrowemu, przy czym parametr obciążenia λ zmieniano w zakresie

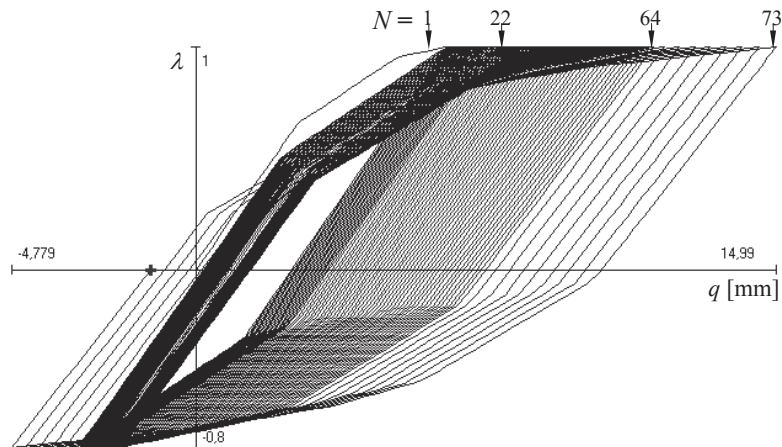
$1,0 \div -0,8$; czas odniesienia $t_0 = 100$ h, temperatura $T = 20^\circ\text{C}$. W kolejnych **seriach obliczeń** zwiększano prędkość korozji, przyjmując coraz to większe wartości stałych C_{SC} , C_{HC} i C_{LC} , odpowiedzialnych za intensywność poszczególnych typów korozji. Pozostałe parametry modeli korozji były następujące: $n = 1$, $\sigma_{gr} = 150$ MPa, $\vartheta = 1$, $\mu = 1,6$, $b = 1$, dla korozyjnego zużycia nisko-cyklicznego uwzględniono zakres odkształceń całkowitych. W kolejnych cyklach obciążenia śledzono ścieżkę równowagi tzn. relację pomiędzy przemieszczeniem



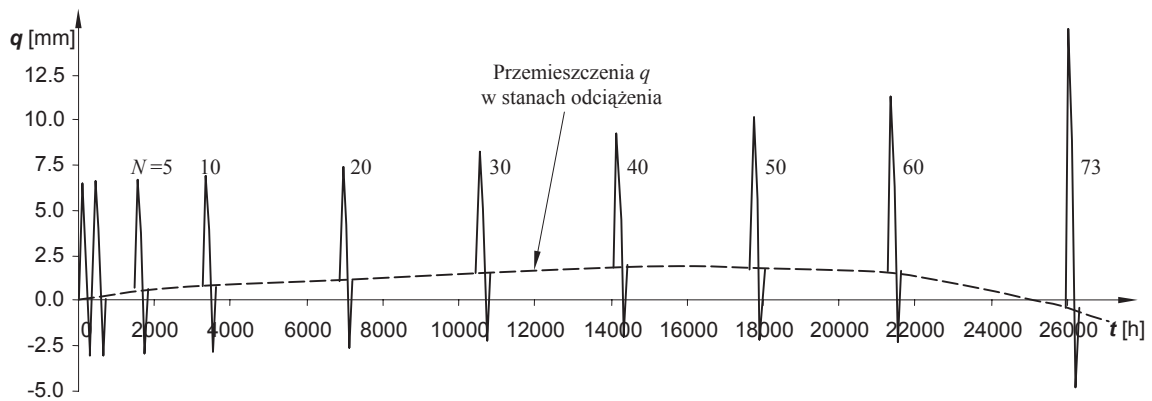
Rys. 3. Geometria konstrukcji

q (rys. 3) i parametrem λ , przyrosty energii dysypowanej, zmianę pól przekrojów wybranych prętów oraz zmianę geometrii konstrukcji w kolejnych przyrostach obciążenia. Wyniki przedstawiono poniżej w postaci wykresów i rysunków.

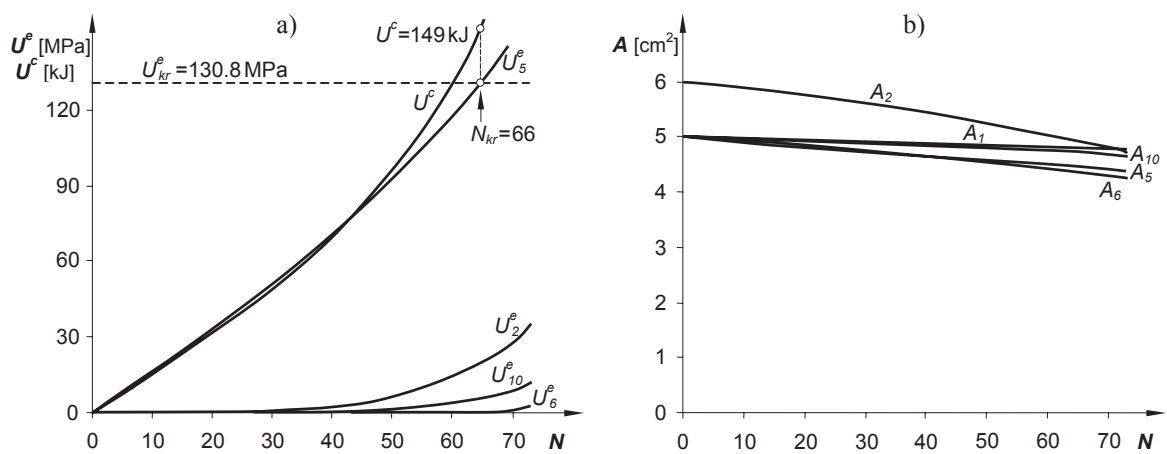
4.1. Wyniki obliczenia przy stałych modeli korozji: $C_{SC} = 2 \cdot 10^{-6}$, $C_{HC} = 1 \cdot 10^{-5}$, $C_{LC} = 1 \cdot 10^{-6}$



Rys. 4. Relacja między przemieszczeniem q a parametrem λ w kolejnych cyklach obciążenia N



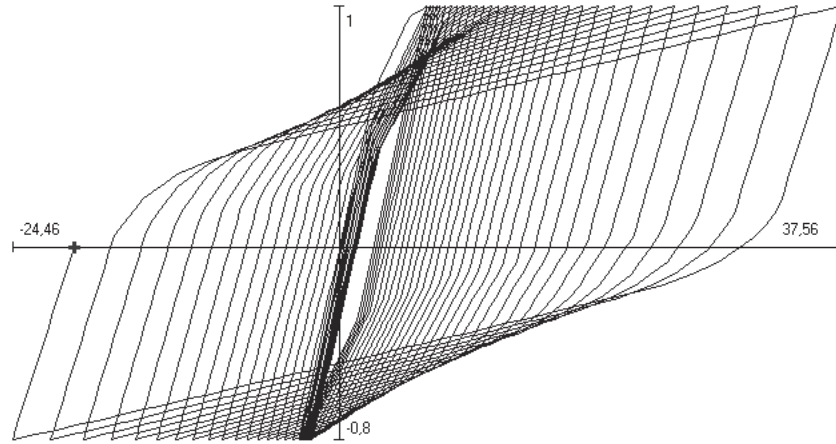
Rys. 5. Widma przemieszczenia q w czasie t dla wybranych cykli obciążenia



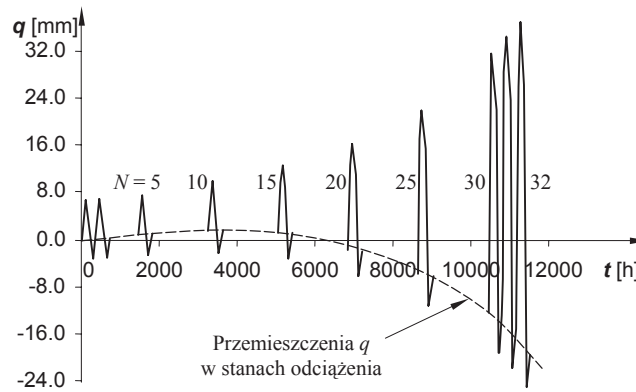
Rys. 6. Energie dysypowane – jednostkowe U^e i całkowita U^c (a) oraz zmiany przekrojów prętów (b) w zależności od liczby cykli N

4.2. Wyniki obliczenia przy stałych modeli

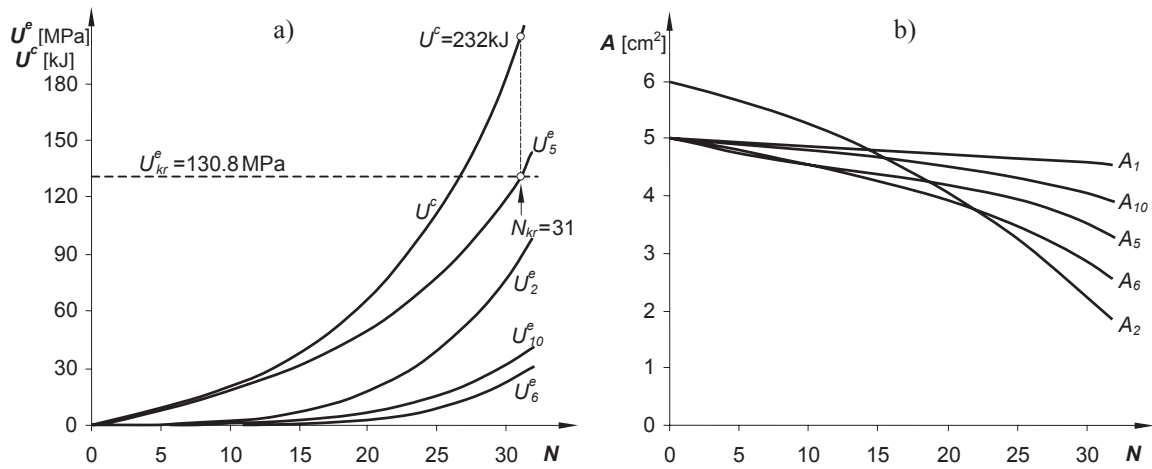
korozji: $C_{SC} = 2 \cdot 10^{-5}$, $C_{HC} = 4,6 \cdot 10^{-5}$, $C_{LC} = 3,5 \cdot 10^{-6}$



Rys. 7. Relacja między przemieszczeniem q a parametrem λ w kolejnych cyklach obciążenia N



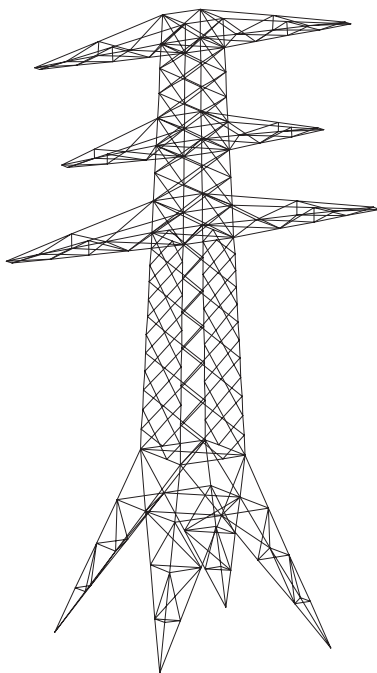
Rys. 8. Widma przemieszczenia q w czasie t dla wybranych cykli obciążenia



Rys. 9. Energie dysypowane – jednostkowe U^e i całkowita U^c (a) oraz zmiany przekrojów prętów (b) w zależności od liczby cykli N

5. PODSUMOWANIE

Przytoczone przykładowe wyniki symulacji numerycznych oraz ich analiza pokazują, że wykorzystując zaawansowane narzędzia numerycznej mechaniki, można budować modele zezwalające na symulację stanu referencyjnego, zmieniającego się w trakcie cyklicznych obciążeń konstrukcji. Natomiast uzyskane dane mogą być wykorzystywane w diagnostyce obiektów rzeczywistych. Obecnie ze względu na możliwości obliczeniowe maszyn cyfrowych, taka analiza w czasie rzeczywistym jest możliwa dla konstrukcji dyskretyzowanych kilku tysiącami stopniami swobody. Nie jest wykluczone, że dalszy rozwój metod numerycznych i techniki komputerowej pozwoli analizować konstrukcje dyskretyzowane nawet za pomocą 10-40 milionów stopni swobody, co pozwoliłoby na symulację urządzeń jako całości, a nie tylko wybranych jej elementów. W przypadku konstrukcji wieloelementowych takich jak np. kratownica pokazana na rys. 10, można użyć analizy



Rys. 10. Przykład rzeczywistej konstrukcji kratowej – słup energetyczny wysokiego napięcia [9]

mieszanej 1D/3D – obliczając pręty w modelach 1D zaś niektóre krytyczne połączenia w modelach 3D.

Oczywiście dokładność opisu zachowania się rzeczywistych urządzeń i konstrukcji zależeć będzie nie tylko od kalibracji stałych modeli matematycznych, lecz przede wszystkim od tego, jak wiele zjawisk wpływających na zachowanie konstrukcji zostanie w tych modelach ujętych. Należy przy tym nadmienić, że zjawiska jak np. plastyczność, pełzanie, kruche pękanie, korozja naprężeniowa, zmęczenie nisko- i wysokocykliczne, reologia czy zmiękczenie są nieliniowe

a niektóre z nich mają charakter nieustalony. Natomiast zjawiska typu: praca na odkształceniach niesprężystych, praca naprężeń lepkich, energia chemiczna korozji indukowanej naprężeniowo itd. są nieodwracalne.

LITERATURA

- [1] Dudda W., Badur J., Chróścielewski J.: *Weryfikacja metody obliczeń konstrukcji kratowej obciążonej w zakresie sprężysto-plastycznym*. Gdańsk, Archiwum IMPPAN nr 151/2000, 2000.
- [2] Dudda W., Badur J.: *Ocena żywotności konstrukcji przy użyciu numerycznych metod mechaniki*. Olsztyn, Wydawnictwo UWM, 2001, str. 109-119.
- [3] Dudda W., Badur J.: *Numeryczna analiza adaptacji sprężysto-plastycznej konstrukcji w warunkach zniszczenia wysokotemperaturową korozją*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej nr 24/2001, str. 145-152.
- [4] Kocańda S., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. Warszawa, WNT, 1997.
- [5] Chróścielewski J., Branicki Cz.: *MINIMOD – Pakiet podprogramów wspomagający badanie zagadnień nieliniowych*. Materiały IX Konf. Metody Komputerowe w Mechanice. Kraków-Rybro 1989, tom 1, str. 131-138.
- [6] Chróścielewski J.: *Rodzina elementów skończonych klasy C^0 w nieliniowej sześcioparametrowej teorii powłok*. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej - Nr 540, praca hab., Gdańsk 1996.
- [7] Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M.: *Badanie własności mechanicznych metali*. Wyd. 3, Warszawa, WNT, 1969.
- [8] Kleiber M., Kotula W., Saran M.: *Numerical analysis of dynamic quasi-bifurcation*. Eng. Comput. Vol. 4, March 1987, str. 48-52.
- [9] Dudda W., Nałęcz T. J., Pelc J.: *Komputerowe wspomaganie projektowania i obliczenia wielkich konstrukcji kratowych*. Materiały Konferencji „Mechanika 97”, Gdańsk, 1997.



Dr inż. Waldemar Dudda (ur. 1965). Absolwent Wydziału Mechanicznego Akademii Rolniczo Technicznej w Olsztynie (1993). Stopień doktora uzyskał na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej (2003). Autor 6 artykułów dotyczących oceny

zachowania się konstrukcji pracujących w ekstremalnych warunkach, znajdujących się pod wpływem wieloparametrowych i/lub cyklicznych obciążeń mechanicznych, termicznych i chemicznych.