



Numeryczna analiza korodujących konstrukcji kratowych

WALDEMAR DUDDA

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych,
10-719 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 11

Streszczenie. Opracowanie dotyczy możliwości wykorzystania zaawansowanych narzędzi numerycznej mechaniki do 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 rozpraszają energię, którą stanowią wkłady od nieodwracalnych zjawisk typu praca na odkształceniach niesprężystych. Trwałość konstrukcji i jej elementów oceniana jest za pomocą kryterium energetycznego. 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. W opracowaniu prezentowane jest wykorzystanie programu numerycznego do analizy stanu konstrukcji kratowych. Program bazuje na metodzie elementów skończonych, w którym zaimplementowano modele uwzględniające korozyjną degradację materiału konstrukcji.

Słowa kluczowe: obciążenie cykliczne, degradacja konstrukcji, korozja naprężeniowa, elektrochemiczna, nisko-cykliczna, kryterium energetyczne

Symbole UKD: 624.023

1. Wstęp

Użytkowanie rzeczywistych konstrukcji często prowadzi do przekroczenia stanów sprężystych, na które te konstrukcje są projektowane. Materiały tworzące te konstrukcje ulegają jednocześnie różnym form degradacji spośród których do najmniejbezpiecznych należy zaliczyć plastyczność, termiczne zmęczenie i korozję. Z uwagi na stawiany przez nowoczesny przemysł wymóg wysokiej dyspozycyjności urządzeń oraz żądania określenia dla nich wiarygodnych pro-

gnoz odnośnie dalszej eksploatacji, niniejszy temat ma duże znaczenie praktyczne zwłaszcza tam, gdzie nie istnieją probabilistyczne sposoby szacowania trwałości resztkowej. W pracy podjęto próbę wykorzystania zaawansowanych narzędzi numerycznej mechaniki konstrukcji do budowy modeli zezwalających na symulację stanu konstrukcji, zmieniającego się w trakcie cyklicznych obciążeń mechanicznych, termicznych z uwzględnieniem degradacji korozyjnej materiału nośnego konstrukcji [3, 4].

2. Modelowanie zjawiska korozji

Procesy korozyjne obejmują chemiczne i elektrochemiczne reakcje na granicy faz metal/środowisko oraz zjawiska przebiegające w warstwie przypowierzchniowej i wewnątrz metalu, na które nakładają się zjawiska związane z odkształcaniem się metalu pod wpływem obciążenia zmiennego w czasie. Dominującymi zjawiskami wynikającymi z oddziaływania konstrukcji z agresywnym środowiskiem są: korozja naprężeniowa jako współdziałanie korozyjnego środowiska i dużych naprężeń rozciągających, korozja elektrochemiczna, chemiczna i gazowa zależna od temperatury i obecności produktów spalania oraz korozja niskocykliczna, będąca wynikiem oddziaływania między zwykłą korozją elektrochemiczną a zmiennymi obciążeniami termomechanicznymi. W pracy analizuje się trzy postaci zjawiska korozji, którego skutkiem jest zmniejszanie się pola przekroju poprzecznego elementu. Prędkości ubytku zewnętrznej warstwy materiału pręta opisano następującymi równaniami [5]:

— korozja naprężeniowa

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

— korozja chemiczna, elektrochemiczna i gazowa

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

— korozja nisko-cykliczna

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

W powyższych wzorach d oznacza grubość zewnętrznej warstwy materiału ulegającej korozji [mm], \dot{d} — szybkość korozji [mm/h], T — temperaturę, N — ilość cykli, σ_{eff} — intensywność naprężeń, σ_{gr} — naprężenie graniczne, poniżej którego nie występuje zjawisko korozji naprężeniowej, $\Delta \varepsilon_{eff}$ — 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. Całkowity ubytek grubości elementu

kratowego oblicza się jako sumę $d = d_{SC} + d_{HC} + d_{LC}$. Stałe C_{SC} , C_{HC} , C_{LC} charakteryzują wpływ środowiska korozyjnego na szybkość degradacji materiału konstrukcyjnego. Weryfikację podanych modeli i określenie wpływu szczególnych stałych modeli korozji na prędkość degradacji zawiera opracowanie autora [6]. Dane doświadczalne, dotyczące modelowania korozji naprężeniowej, elektrochemicznej oraz cyklicznej, pochodzą z prób jednoosiowego rozciągania próbek walcowych [8, 10, 7, 11], stąd aby należyte skalibrować stałe w proponowanych i używanych modelach, badania ograniczono do konstrukcji prętowych, dyskretyzowanych jednowymiarowymi kratowymi elementami skończonymi.

3. Energetyczne kryterium zniszczenia

Podstawę kryterium energetycznego stanowi jednostkowa energia nieodwracalnie rozproszona 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 — przyrost pracy naprężeń na odkształceniach plastycznych, odpowiadający i -temu przyrostowi obciążenia;
 N — liczba cykli zmian obciążenia;
 k — liczba przyrostów obciążenia w cyklu;
 V — objętość elementu.

Przyjęto, że zniszczenie j -tego elementu następuje, gdy energia przez niego zdysypowana osiągnie wartość energii krytycznej. Warunek ten 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. Jeśli dysponuje się 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, którą w przybliżony sposób można określić wg zależności Broniewskiego [9]:

$$U = 0,0025(3R_m + R_e) A_{10}. \quad (6)$$

Inną wielkością charakteryzującą stan konstrukcji jest całkowita ilość energii nieodwracalnie w niej rozproszonej. Obserwacja zmiany całkowitej energii dysy-

powanej przez konstrukcję z cyklu na cykl może być jednym z czynników oceny wrażliwości konstrukcji na program obciążeń. Dla konstrukcji składających się z n elementów (np. konstrukcje kratowe) energię globalną określono jako sumę energii poszczególnych jej elementów:

$$U^C = \sum_{i=1}^{k \cdot N} \sum_{j=1}^n \Delta W_{ij}. \quad (7)$$

Powyższy zapis nie oznacza tu wielkości tensorowej, a ΔW_{ij} jest przyrostem pracy naprężeń na odkształceniach plastycznych j -tego elementu konstrukcji, odpowiadającym i -temu przyrostowi obciążenia.

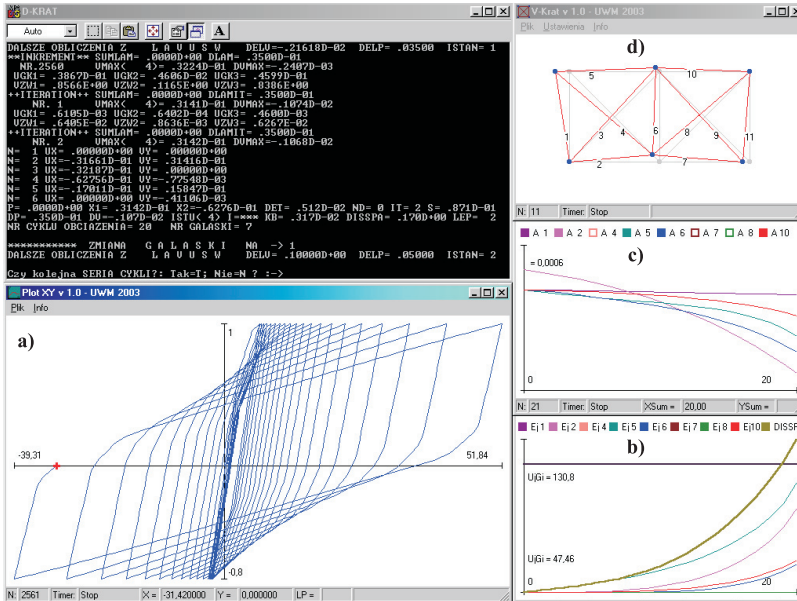
4. Program numeryczny

Kod numeryczny D-KRAT został zbudowany przez autora [6] na bazie biblioteki *Mini-Mod* zawierającej procedury solwera MES, opracowanej przez Chróścielewskiego i Branickiego [1]. Zaimplementowano w nim opracowane modele zjawisk fizycznych takich jak korozja naprężeniowa, elektrochemiczna, gazowa oraz korozyjne zużycie niskocykliczne. Ponadto dołączono moduły pozwalające uwzględnić wpływ obciążenia termicznego na własności fizyczne i mechaniczne materiału, obliczające odkształcenia termiczne i energię dyssypowaną przez poszczególne pręty. Wprowadzono również model cyklicznego umocnienia/osłabienia materiału. Zamodelowane tu zjawiska są na ogół nieliniowe, stąd rozwiązywanie nieliniowego układu równań uzyskuje się w procesie przyrostowo-iteracyjnym. Natomiast w zakresie śledzenia nieliniowych ścieżek obciążenia używana jest technika numeryczna opracowana przez Chróścielewskiego [2]. Ponadto, dzięki opracowanym podprogramom do wizualizacji wyników obliczeń [6], stworzono możliwość śledzenia: ścieżki równowagi, odkształceń konstrukcji, dyssypacji energii i degradacji czynnego przekroju poszczególnych elementów konstrukcji już w trakcie symulacji numerycznej. Na rysunku 1 przedstawiono współdziałanie modułu obliczeniowego programu D-KRAT z podprogramami od wizualizacji wyników on-line.

5. Analiza numeryczna konstrukcji kratowych

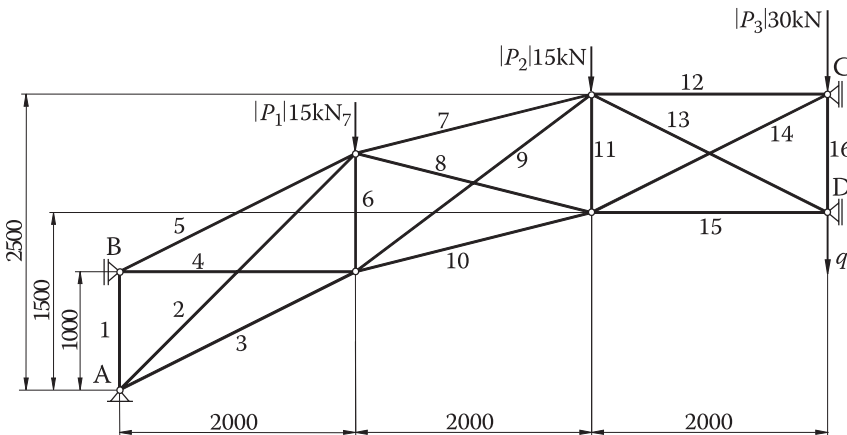
5.1. Określanie chwili pojawienia się odkształceń plastycznych oraz zniszczenia

Symulację numeryczną wykonano dla konstrukcji kratowej wykonanej ze stali St3S, której geometrię przedstawiono na rysunku 2. Pola przekroju poprzecznego okrągłych prętów wynosiły: $A_1 = 6 \text{ cm}^2$, $A_{12} = 4 \text{ cm}^2$, pozostałe pręty 5 cm^2 . Stałe materiałowe dla stali St3S wynoszą: moduł Younga $E = 2,110^5 \text{ MPa}$, moduł plastycz-



Rys. 1. Śledzenie ścieżki równowagi (a), zmiany energii dyssypowanej (b), degradacji pól poszczególnych elementów (c) i odkształceń konstrukcji (d) w trakcie cyklicznych zmian obciążenia

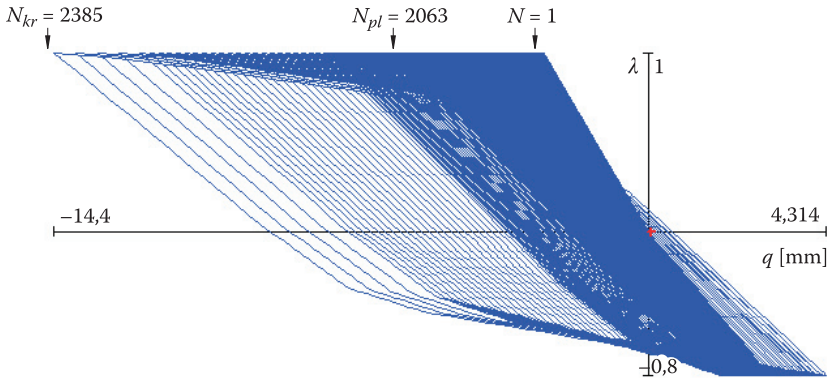
ności $E_T = 10^4$ MPa, granica plastyczności $R_e = 230$ MPa, doraźna wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 400$ MPa. Parametry modeli korozji: $C_{SC} = 9 \cdot 10^{-8}$, $C_{HC} = 9 \cdot 10^{-7}$, $C_{LC} = 9 \cdot 10^{-9}$, $n = 1$, $\sigma_{gr} = 150$ MPa, $B = 170$, $\kappa = 1$, $\vartheta = 1$, $\mu = 1,6$ i $b = 1$. W trakcie obliczeń śledzono ścieżkę równowagi (rys. 3) przemieszczenia kontrolnego q (rys. 2),



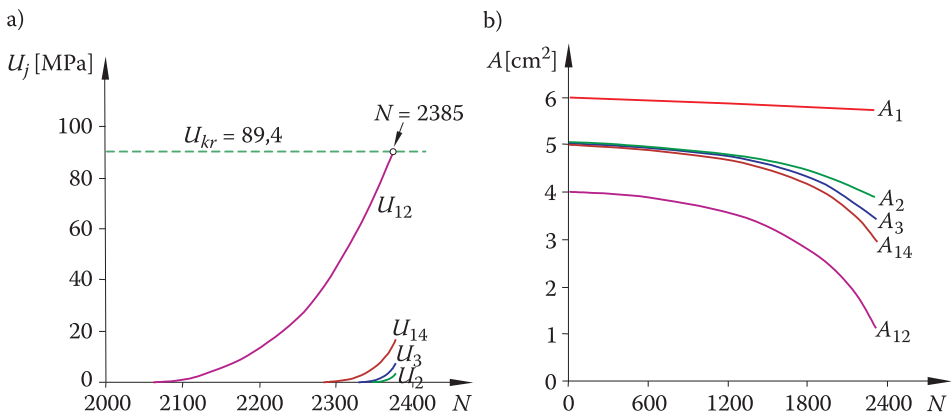
Rys. 2. Geometria konstrukcji kratowej

przyrosty energii dyssypowanej (rys. 4a) oraz zmianę pól przekrojów wybranych prętów (rys. 4b). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Z analizy wyników widać, że jako pierwszy uplastyczniał się pręt 12 w 2063 cyklu obciążenia (rys. 3) i on w największym stopniu dyssypował energię, a zgodnie z przyjętym kryterium energetycznym pręt ten ulega zniszczeniu w 2385 cyklu (rys. 4a).



Rys. 3. Wykres zależności przemieszczenia q od parametru λ dla kolejnych cykli obciążenia N

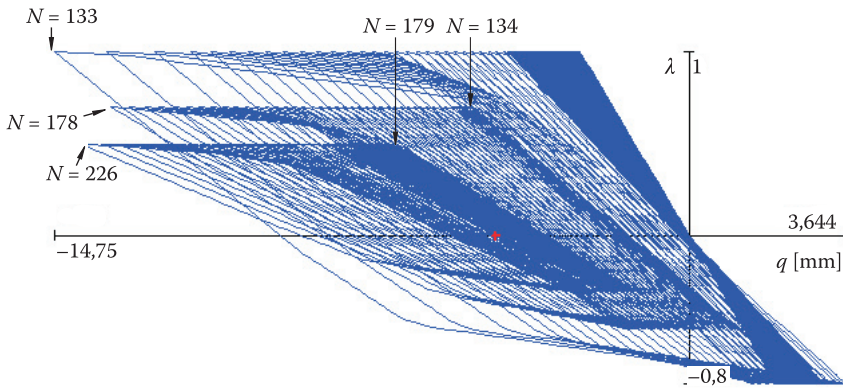


Rys. 4. Dyssypacja energii wybranych prętów (a) oraz zmiana ich przekrojów w kolejnych cyklach obciążenia N (b)

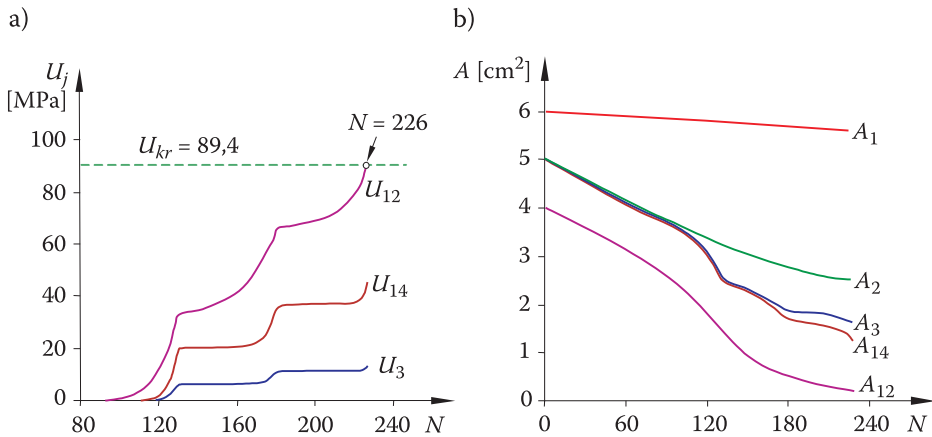
5.2. Wpływ zmiany zakresu obciążenia na zachowanie się konstrukcji

Założmy, że ze względów technicznych nie możemy przekroczyć granicznych wartości przemieszczeń określonych węzłów konstrukcji. Jednakże na skutek degradacji konstrukcji, jej przemieszczenia zbliżają się do wartości granicznych.

Nasuwa się pytanie, o ile należałoby obniżyć poziom obciążenia, aby ta konstrukcja mogła być jeszcze przez pewien czas eksploatowana, np. do chwili najbliższego planowego remontu. Załóżmy, że dla konstrukcji z poprzedniego rozdziału taką graniczną wartością będzie $q_{gr} = 15$ mm. Parametry modeli korozji: $C_{SC} = 8,6 \cdot 10^{-6}$, $C_{HC} = 6,07 \cdot 10^{-5}$, $C_{LC} = 1,2 \cdot 10^{-5}$, pozostałe stałe bez zmian. Symulację numeryczną rozpoczęto z zakresem obciążenia $1,0 \div -0,8$; po 133 cyklu zmniejszono zakres obciążenia do $0,7 \div -0,5$; a po 178 cyklu — do $0,5 \div -0,3$. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Wpływ zmniejszenia zakresu obciążenia na przemieszczenie kontrolne q



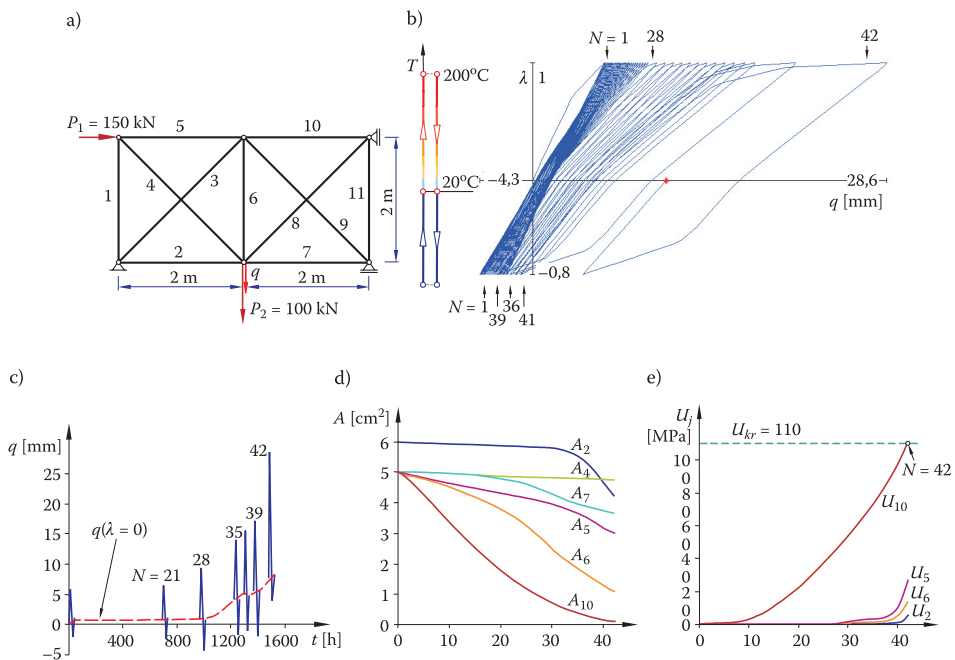
Rys. 6. Wpływ zmniejszenia zakresu obciążenia na dyssypację energii (a) oraz na zmianę przekrojów prętów w kolejnych cyklach obciążenia N (b)

Z analizy rysunku 5 wynika, że gdyby nie zmniejszono zakresu obciążenia po 133 cyklu już przy następnym obciążeniu konstrukcji, jej przemieszczenia kontrolne przekroczyłyby wartość graniczną. Podobna sytuacja ma miejsce w 178 cyklu.

Po 226 cyklu dalsza zmiana zakresu obciążenia nie ma już sensu, ponieważ zgodnie z przyjętym kryterium energetycznym nastąpiłoby uszkodzenie pręta 12 (rys. 6a), którego pole uległo prawie całkowitej degradacji (rys. 6b).

5.3. Degradacja konstrukcji obciążonej termomechanicznie

Analizie poddano konstrukcję kratową przedstawioną na rysunku 7a. Pola przekroju poprzecznego prętów: $A_2 = 6 \text{ cm}^2$, $A_{11} = 4 \text{ cm}^2$, pozostałe pręty — 5 cm^2 . Własności materiału: moduł Younga $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, moduł umocnienia $E_T = 2 \cdot 10^4 \text{ MPa}$, granica plastyczności $R_e = 430 \text{ MPa}$, wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 700 \text{ MPa}$, współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Parametry modeli korozji: $C_{SC} = 2 \cdot 10^{-6}$, $C_{HC} = 1 \cdot 10^{-5}$, $C_{LC} = 1 \cdot 10^{-6}$, $n = 1$, $\sigma_{gr} = 150 \text{ MPa}$, $B = 170$, $\kappa = 1$, $\vartheta = 1$, $\mu = 1,6$ i $b = 1$. Wykonano symulację numeryczną cyklicznego obciążenia konstrukcji. Parametr obciążenia λ zmieniano w zakresie $1,0 \div -0,8$ (rys. 7b), natomiast temperatura zmieniała się tylko w przedziale dodatnich wartości parametru obciążenia w zakresie $20 \div 200^\circ\text{C}$ (rys. 7b). Wyniki obliczeń numerycznych zestawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Geometria konstrukcji (a), ścieżka równowagi $q = f(\lambda)$ (b), zmiana przemieszczenia kontrolnego w czasie $q = f(t)$ (c), zmiana przekrojów prętów w kolejnych cyklach obciążenia (d), dyssypacja energii wybranych prętów w kolejnych cyklach obciążenia (e)

Rysunek 7d ukazuje w jak różnym stopniu ulegają degradacji poszczególne elementy konstrukcji. Pręt nr 6 jest drugi w kolejności pod względem szybkości degradacji korozyjnej, lecz dyssypuje mniej energii niż pręt 5 (rys. 7d), którego degradacja korozyjna jest o wiele wolniejsza (rys. 7e).

6. Podsumowanie

Przytoczone powyżej przykładowe wyniki obliczeń dwóch konstrukcji kratowych oraz ich analiza, np. wykresów cyklicznych przemieszczeń, pokazują, że jeśli wykorzystana się zaawansowane narzędzia numerycznej mechaniki konstrukcji, można budować modele zezwalające na symulację stanu konstrukcji, zmieniającego się w trakcie cyklicznych jej obciążeń. Wyniki obliczeń dostarczają informacji zarówno o zachowaniu się konstrukcji jako całości, jak i informacji o degradacji poszczególnych jej elementów składowych. Dzięki archiwizacji wyników po każdym kroku obliczeniowym mamy dostęp do pełnej historii eksploatacji konstrukcji.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2006 r.

LITERATURA

- [1] J. CHRÓSCIELEWSKI, Cz. BRANICKI, *MINIMOD — Pakiet podprogramów wspomagający badanie zagadnień nieliniowych*, Materiały IX Konferencji „Metody komputerowe w mechanice”, t. 1, Kraków-Rybro, 1989, 131-138.
- [2] J. CHRÓSCIELEWSKI, *Rodzina elementów skończonych klasy C^0 w nieliniowej sześcioparametrowej teorii powłok*, Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 540, praca hab., Gdańsk, 1996.
- [3] W. DUDDA, J. BADUR, J. CHRÓSCIELEWSKI, *Weryfikacja metody obliczeń konstrukcji kratowej obciążonej w zakresie sprężysto-plastycznym*, Archiwum IMPPAN, nr 151, Gdańsk, 2000.
- [4] W. DUDDA, J. BADUR, *Ocena żywotności konstrukcji przy użyciu numerycznych metod mechaniki*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn, 2001a, 109-119.
- [5] W. DUDDA, J. BADUR, *Numeryczna analiza adaptacji sprężysto-plastycznej konstrukcji w warunkach zniszczenia wysokotemperaturową korozją*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, nr 24, Białystok 2001b, 145-152.
- [6] W. DUDDA, *Numeryczna analiza konstrukcji ulegającej degradacji korozyjnej*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk, nr 1456, Gdańsk, 2005, 1-144.
- [7] C. GOANA-TIBURCIO, F. ALMERAYA-CALDERON, A. MARTINEZ-VILLAFANE, R. BAUTISTA-MARGULIS, *Stress corrosion cracking behavior of precipitation hardened stainless steels in high purity water environments*, Anti-Corrosion Methods and Materials, vol. 48, 1, 37-46, 2001.
- [8] M. JAKUBOWSKI, *Mechanizm propagacji pęknięć korozyjno-zmęczeniowych w stali austenitycznej zbliżonej do AISI 316LN*, Materiały XVIII Sympozjum „Zmęczenia materiałów i konstrukcji”, Bydgoszcz-Pieczyska, 2000, 179-186.
- [9] S. KOCAŃDA, J. SZALA, *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, WNT, Warszawa, 1997.

- [10] H. S. KOWN, E. A. CHO, K. A. YEOM, *Predication of stress corrosion cracking susceptibility of stainless steels based on repassivation kinetics*, Corrosion, vol. 56, no. 1, 2000, 32-40.
- [11] J. M. OLIVE, J. CWIEK, D. DESJARDINS, *Quantification of the hydrogen produced during corrosion fatigue cracking propagation*, Corrosion Science 41, 1999, 1067-1078.

W. DUDDA

Numerical analysis of corroding truss structures

Abstract. The paper deals with the possibilities of advanced tools of numerical mechanics utilization for assessment of behaviour of structures working under extreme conditions and influenced by multiparameter and/or cyclic mechanical, thermal, and chemical loads. Particular elements of the structure undergo plastic and corrosive degradation and they dissipate energy from irreversible effects such as work on the inelastic strains. Lifetime of a structure and its units is estimated by means of the energy criterion. The main focus was on modelling and numerical implementation of degradation effects, such as cyclic plasticity generated by mechanical and thermal loads, stress corrosion, electrochemical corrosion and low-cyclic corrosion. Application of software for analysis of truss structures state is presented in this paper. In the software, based on the finite elements method, the models taking into account the corrosive degradation of structure material are implemented.

Keywords: cyclic load, structure degradation, stress corrosion, electrochemical corrosion, low-cyclic corrosion, energetic criterion

Universal Decimal Classification: 624.023