

Dwayne DAVID

Józef PARCHAŃSKI

## WYZNACZANIE NAPRĘŻENIA ROZCIĄGAJĄCEGO WEWNĘTRZNEGO OGNIWA ŁAŃCUCHA POCIĄGOWEGO TYPU F-100

**Streszczenie.** Metodą elementów skończonych wyznaczono wartości naprężeń rozciągających  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  w kierunkach osi X, Y i Z. Naprężenia obliczono na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni, na środkowej ścianie oraz w czterech warstwach wewnętrznego ogniwa łańcucha typu F-100. Na prostych odcinkach ogniwa wartości naprężenia  $\sigma_x$  na wewnętrznych powierzchniach są około 3 razy większe niż na zewnętrznych powierzchniach ogniwa. Maksymalne obliczone wartości naprężenia (około 470 MPa) są mniejsze niż minimalna wytrzymałość stali (około 690 MPa), z której wykonany jest łańcuch typu F-100. Wyznaczone wartości naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  będą przydatne przy opracowaniu przetwornika naprężenia zbudowanego na bazie wewnętrznego ogniwa tego łańcucha.

## A DETERMINATION OF THE TENSILE STRESS WITHIN AN INTERNAL F-100 CHAIN LINK

**Summary.** The  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  tensile stress values in the direction of the X, Y and Z axes were determined by the finite elements method. The stress values were calculated for the inner and outer surfaces, the middle wall and for four inner layers of the internal F-100 chain link. On the straight sections of the chain link, the  $\sigma_x$  stress values of the inner surface are approximately 3 times larger than those of the corresponding outer surfaces. The maximum calculated stress values (approximately 470 MPa) are lower than the minimum tensile strength of the steel (approximately 690 MPa) from which the F-100 chain link is made. The  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  strength values calculated will be used to develop a stress transducer based on the internal F-100 chain link.

### 1. WSTĘP

Łańcuchy pociągowe rozbieralne typu F-100 są stosowane np. w przonośnikach linii montażowych samochodów osobowych. Długość linii montażowej wynosi przykładowo 500 metrów, a jej prędkość przesuwu około 2 m/min. Istotną właściwością jest bezawaryjna

praca linii montażowej. Mimo zastosowania łańcucha o wielokrotnie większej wytrzymałości na rozerwanie niż średnia wartość siły wzdłużnej, działającej na łańcuch (duży współczynnik bezpieczeństwa), zdarzają się przypadki rozerwania ognia wewnętrznego tego łańcucha.

Wymiana uszkodzonego ognia na nowe, w zależności od tego, czy rozerwanie nastąpiło na prostym poziomym odcinku przenośnika, na łuku czy na podjeździe do stacji napędowej, zajmuje średnio od 30 do 70 minut. Jeżeli w czasie godziny produkuje się około 20 samochodów, to pęknięcie ognia łańcucha jest przyczyną bardzo dużych strat dla producenta. W związku z tym powstał problem wyznaczenia naprężenia w całej objętości ognia wewnętrznego podczas rozciągania siłą działającą równoległe do osi ognia (na prostym odcinku przenośnika) oraz siłą działającą pod określonym kątem do osi ognia (na łuku przenośnika). W warunkach przemysłowych można zmierzyć naprężenie tylko na wewnętrznej powierzchni ognia wewnętrznego (np. za pomocą tensometrów). W warunkach laboratoryjnych można mierzyć naprężenie na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ognia. Nie ma możliwości pomiaru naprężenia w dowolnie wybranym punkcie struktury ognia. Zdecydowano się zatem na wyznaczenie naprężenia w wybranych miejscach ognia metodą elementów skończonych [1].

## 2. PODZIAŁ OGNIWA NA ELEMENTY I WĘZŁY

W metodzie elementów skończonych badany model jest podzielony na małe elementy, np. odcinki, trójkąty itp., których strukturę można łatwo zapamiętać w komputerze. Funkcja próbna wewnątrz każdego elementu jest określana w jak najprostszej postaci, najczęściej jest to wielomian trzeciego lub czwartego rzędu. Współczynniki (niewiadome) wielomianu są tak dobrane, aby wyłonić spośród wszystkich kombinacji liniowych te, które w odpowiedni sposób minimalizują funkcjonal. Współczynniki są wyznaczane z odpowiedniego układu równań algebraicznych również za pomocą komputera. Im więcej jest elementów tworzących model, tym dokładniejsze są rozwiązania przybliżone, lecz czas wykonania obliczeń dla całego modelu również wzrasta.

Metoda elementów skończonych jest metodą analityczną, dającą przybliżone rozwiązania spowodowane licznymi założeniami (np. dotyczące struktury modelu, warunków brzegowych itp.). Jest stosowana w przypadkach, w których rzeczywiste pomiary ze względu na koszt, czasochłonność, trudność, bezpieczeństwo itp. nie mogą być realizowane. Przy ogromnych dostępnych dziś mocach obliczeniowych metoda elementów skończonych może być stosowana we wstępnych fazach projektowania układów pomiarowych, ponieważ podpowiada, jakich rzeczywistych wyników można się spodziewać.

Aby dokładnie zdefiniować naprężenie  $\sigma = F/A$ , gdzie  $F$  jest siłą,  $A$  jest polem przekroju prostopadłym do działającej siły, należy uwzględnić stan obciążenia materiału w różnych jego punktach. W tym celu wybiera się dowolny punkt  $P$  otoczony sześcianiem o krawędziach

równoległych do osi układu kartezjańskiego. Na ścianę leżącą na osi np.  $x$  działa siła, która ma trzy składowe również w kierunkach  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Opis naprężeń jest następujący:

$$\sigma_{xx} = F_{xx}/A_x, \quad \sigma_{xy} = F_{xy}/A_x, \quad \sigma_{xz} = F_{xz}/A_x.$$

Postępując analogicznie z pozostałymi ścianami leżącymi na osi  $y$  i  $z$ , otrzymujemy

$$\sigma_{yx} = F_{yx}/A_y, \quad \sigma_{yy} = F_{yy}/A_y, \quad \sigma_{yz} = F_{yz}/A_y.$$

$$\sigma_{zx} = F_{zx}/A_z, \quad \sigma_{zy} = F_{zy}/A_z, \quad \sigma_{zz} = F_{zz}/A_z.$$

Z warunków równowagi momentów działających na mały sześcian wynika, iż

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \quad \sigma_{yz} = \sigma_{zy}, \quad \sigma_{xz} = \sigma_{zx}.$$

Zatem do opisu stanu naprężenia w sześcianie potrzeba jedynie 6 niezależnych składników.

Są to:

$\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  — powodujące wydłużenie lub skrócenie materiału w tych kierunkach;

$\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{xy}$  — powodujące odkształcenie materiału przez ścinanie (naprężenie styczne).

Zatem chcąc opisać naprężenie w modelu, należy posługiwać się przynajmniej takimi wskaźnikami.

Stosowany program obliczeniowy podaje naprężenie w postaci Sigma  $x$  ( $\sigma_x$ ), Sigma  $y$  ( $\sigma_y$ ), Sigma  $z$  ( $\sigma_z$ ), Tau  $xy$  ( $\tau_{xy}$ ), Tau  $yz$  ( $\tau_{yz}$ ), Tau  $zx$  ( $\tau_{zx}$ ) i Sigma redukowane ( $\sigma_{red}$ ) wg np. hipotezy Hubera:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

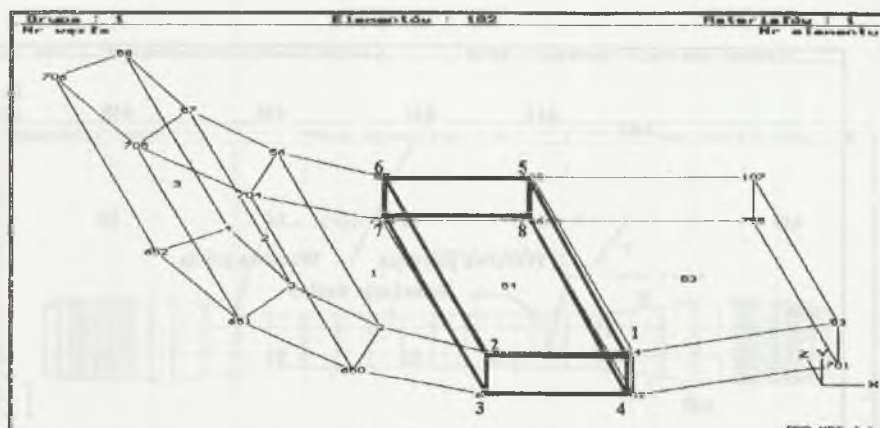
Podaje również maksymalne przemieszczenie. Poszczególne wartości naprężenia i przemieszczenia można łatwo odczytać we wszystkich węzłach modelu.

### 3. ZASTOSOWANIE PROGRAMU PRO-MES4.4

Program PRO-MES4.4 [2] jest dokładnym programem obliczeniowym, stosującym metodę elementów skończonych do wyznaczania naprężeń i przemieszczeń występujących w modelu. Program umożliwia budowę modelu, na początku jako zbioru węzłów, po czym po połączeniu odpowiednich węzłów ze sobą, otrzymuje się zbiór elementów — model. Projektując zbiór węzłów modelu należy mieć na uwadze fakt, iż program może opisać maksymalnie 2000 węzłów. Jednak nie należy przesadzać z liczbą węzłów (dokładnością obliczeń), ponieważ w niektórych sytuacjach może to znacznie wydłużyć czas trwania obliczeń bez znaczącego wpływu na większą dokładność. Na samym początku należy określić materiał lub materiały, z których model jest zrobiony. Program zawiera wykaz niektórych materiałów, wraz z parametrami niezbędnymi

w przyszłych obliczeniach, np. moduł Younge'a, ciężar właściwy, współczynnik rozszerzalności temperaturowej itp. Jeśli model składa się z innych materiałów, to trzeba koniecznie dostarczyć wartości wszystkich parametrów. Program udostępnia szereg narzędzi ułatwiających tworzenie modelu, np. możliwość generowania węzłów na prostej <PROSTA> i na łuku <LUK>, powielania wybranych, już istniejących węzłów przez przesunięcie <MOTYW>, przez obrót <OBRÓT> i przez lustrzane odbicie <LUSTRO>. Bardzo przydatnym narzędziem jest polecenie <GRAFIKA>, które umożliwia oglądanie efektów każdej operacji natychmiast po jej zakończeniu. Oczywiście, wymienione narzędzia są przydatne przy pracy nad modelem symetrycznym lub symetryczną częścią modelu. Jeśli jednak model nie jest symetryczny, to pozostaje żmudna praca wpisywania współrzędnych jego węzłów. Przy dużej liczbie węzłów sprawdzenie wyników pracy jest bardzo trudne, ponieważ ekran wypełniony jest dużą liczbą punktów. Bardzo przydatny jest zmysł projektowania w trzech wymiarach i kartki papieru do zapisania najważniejszych informacji. Po określeniu zbioru węzłów należy tworzyć elementy przez połączenie odpowiednich węzłów ze sobą. Potrzebnych jest 8 węzłów do tworzenia jednego elementu trójwymiarowego. Węzły muszą być połączone tak, aby najpierw obiegowo opisały pierwszą ścianę elementu, a później drugą (rys. 1). Kierunek obiegu na obu ścianach musi być taki sam i węzły o numerach 1 i 5 (w elemencie) muszą tworzyć jedną krawędź. Tu sprawa jest nieco łatwiejsza, ponieważ jeśli model jest symetryczny, można najpierw zbudować jeden lub kilka elementów i resztę utworzyć przez powielenie <MOTYW>.

Po określeniu wszystkich elementów model jest gotowy i pozostaje nam zadawanie obciążeń, więzi, itp., które najdokładniej opisują rzeczywistą sytuację obciążeniową modelu w jego środowisku. Jako obciążenia program oferuje zdefiniowanie sił działających w węzłach lub ciśnienia działającego na ścianach elementów oraz masy modelu. Do przymocowania modelu służą więzi lub podpory, których kierunek działania można indywidualnie określić. Można wyróżnić do 15 wariantów obciążeniowych. Po obciążeniu modelu we właściwy sposób pozostaje wykonanie obliczeń, które w zależności od mocy obliczeniowej (jakość i konfiguracja sprzętu) i dokładności (liczba węzłów) mogą trwać nawet i kilka godzin. Przed wykonaniem obliczeń program oferuje możliwość optymalizacji modelu. Należy zaakceptować tę możliwość, ponieważ liczba bloków równań ulega znacznemu zmniejszeniu, co przyspiesza obliczenia. Inną zaletą optymalizacji jest to, iż można wybrać kierunek optymalizacji,  $x$ ,  $y$  czy  $z$ , sprawdzając w procesie globalne wymiary modelu, tzn. długość, wysokość i szerokość z niedokładnością do  $\pm 0,1$  mm. Po optymalizacji wykonuje się obliczenia. Tu użytkownik nie ma możliwości ingerencji, a jedynie może obserwować intensywny ruch dysku twardego i komunikat o aktualnym etapie obliczeń, pojawiający się na ekranie. Etapy obliczeń kolejno pojawiające się to: 1) obliczenie macierzy sztywności elementów, 2) agregacja — składanie globalnej macierzy sztywności z macierzy sztywności poszczególnych elementów i rozkładanie jej na bloki, 3) podstawienie odwrotne, podczas którego obliczane są przemieszczenia. Naprężenia i siły występujące w elementach są obliczone, a wyniki zapisane.



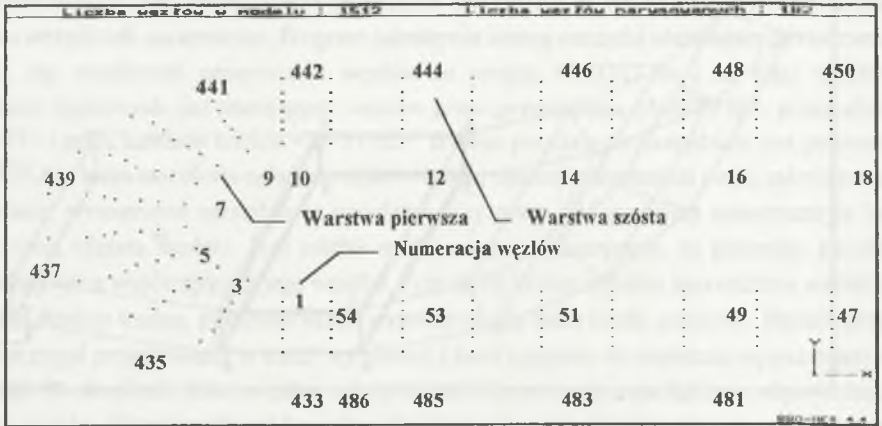
Rys.1. Kolejność zdefiniowania węzłów przy określaniu elementów — cyfry od 1 - 8. Element nr 54 pogrubiony

Fig.1. The sequence of defining nodes while constructing the elements is indicated by the numbers 1 - 8. The edges of element no. 54 in bold type

Oprócz znajomości mechaniki, przydatna jest wiedza i doświadczenie w obsłudze komputerów. Program ma dosyć wąskie wymagania — procesor numeryczny i 600 kB konwencjonalnego RAM. Nie potrzebuje pamięci typu Extended Memory. Dziś można powiedzieć, iż jest to pewne ograniczenie, ponieważ większość nowoczesnych komputerów typu PC posiada przynajmniej 8 MB RAM, z czego większość nie jest wykorzystywana przez program. Jednak aby kilka razy skrócić czas trwania obliczeń, można załadować disc cache o wartości około 6,5 MB z odpowiednio dobranym parametrem opóźniającym jego wyładowania. Spowoduje to, iż liczba operacji zapisu na dysku wykonana przez program zostanie zmniejszona, a zatem czas zapisów również ulegnie skróceniu.

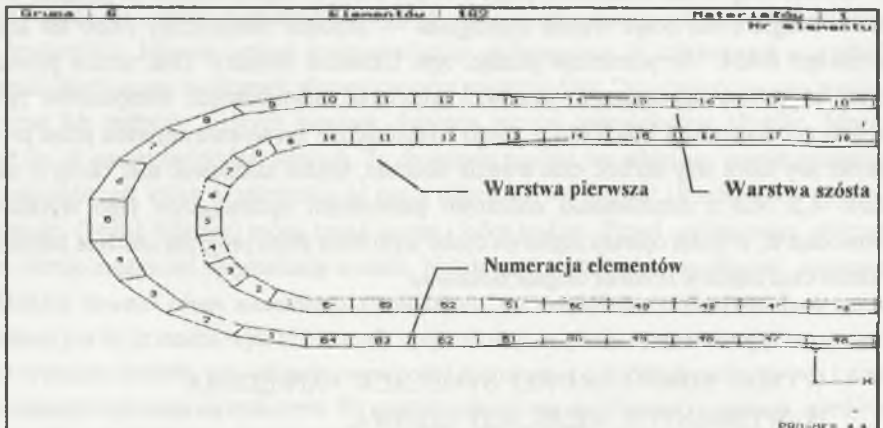
#### 4. WYNIKI KOMPUTEROWEJ SYMULACJI NAPRĘŻENIA W WYBRANYCH MIEJSCACH OGNIWA

Ostatecznie model wewnętrznego ogniwa łańcucha typu F-100 podzielono na 6 warstw (pierwsza, druga, trzecia, czwarta, piąta i szósta — rys.2) oraz na 3 części (dolna, środkowa i górna — rys.4). Model zbudowano z 1512 węzłów i 972 elementów (rys.2, 3 i 4). Elementy w dolnej części ogniwa oznaczono numerami od 1 do 54, w środkowej części od 55 do 108, i w górnej części od 109 do 162. Numery elementów w określonej części (dolna, środkowa i górna) modelu ogniwa są takie same we wszystkich warstwach (rys.3).



Rys.2. Podział ogniwa na warstwy i węzły — część dolna lewej połowy ogniwa, widok od dołu. Widok z góry jest identyczny, lecz numeracja węzłów inna

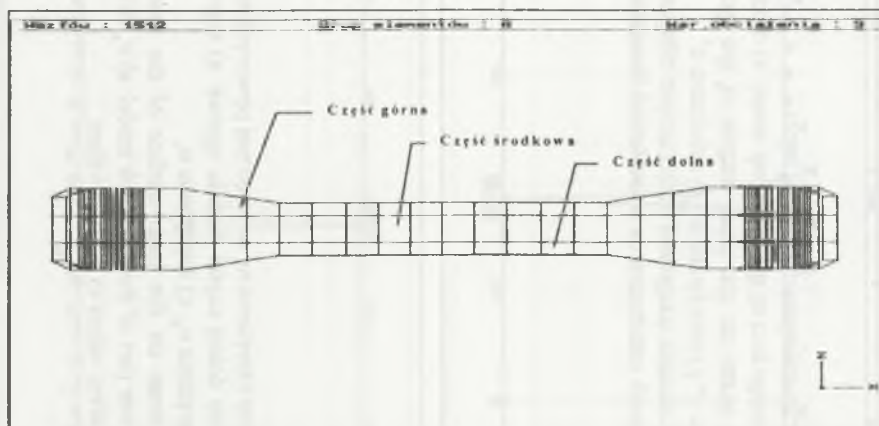
Fig.2. The subdivision of the chain link into layers and nodes — the lower part of the left half shown from the bottom. The top view is identical, except for the node numbers



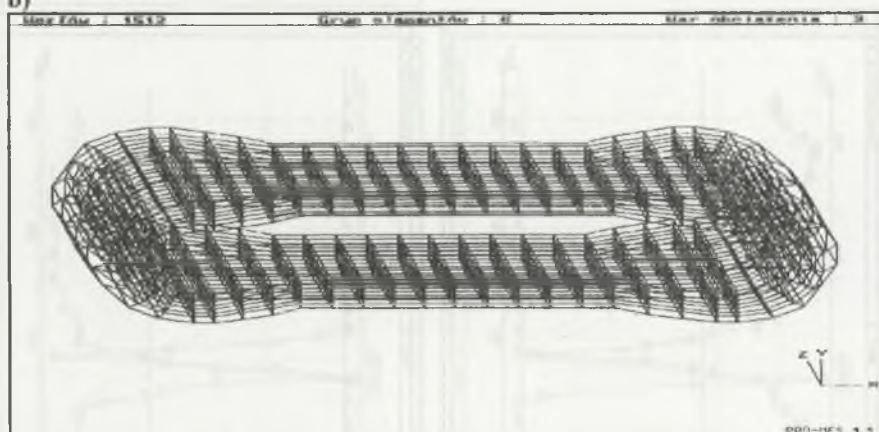
Rys.3. Podział ogniwa na elementy — część dolna lewej połowy ogniwa. Warstwy pierwsza i szósta ponumerowane — dla pozostałych warstw układ jest identyczny. Elementy od 1-54 — część dolna; 55-108 — część środkowa; 109-162 — część górna

Fig.3. The subdivision of the chain link into elements — the lower part of the left half shown. The first and sixth layers are numbered. The numbering is identical for the remaining layers. Elements number 1-54 form the lower part, 55-108 — form the middle part and 109-162 form the upper part of the chain link

a)

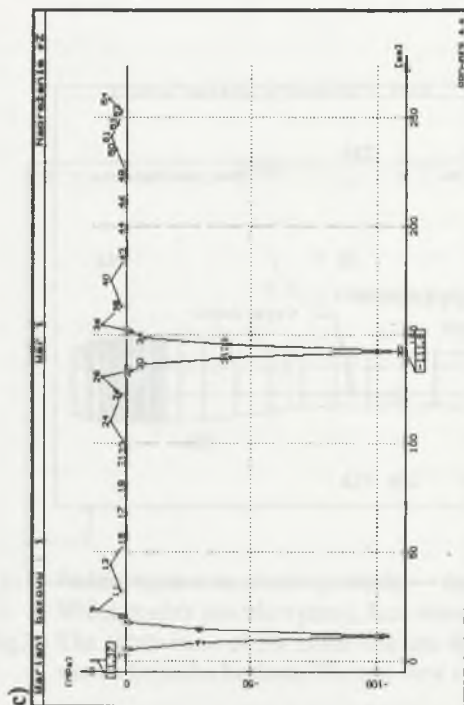


b)



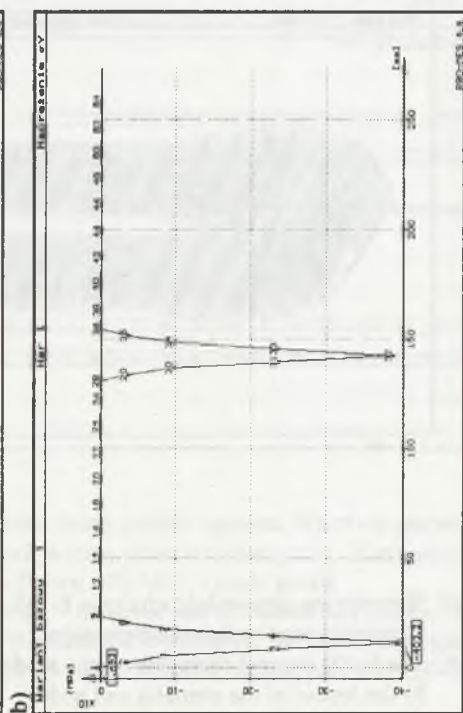
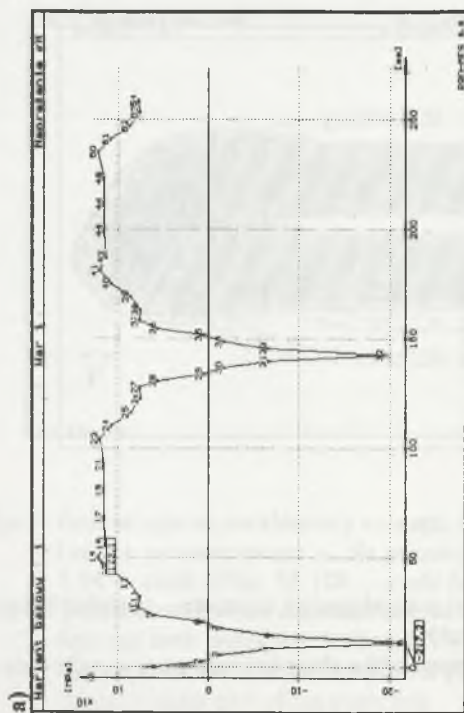
Rys. 4. Wewnętrzne ogniwo łańcucha typu F-100: a) podział ogniwa na części — widok z boku, b) przestrzenne rozłożenie elementów i węzłów

Fig. 4. The F-100 internal chain link: a) the subdivision of the chain link into parts — side view, b) the layout of the elements and nodes

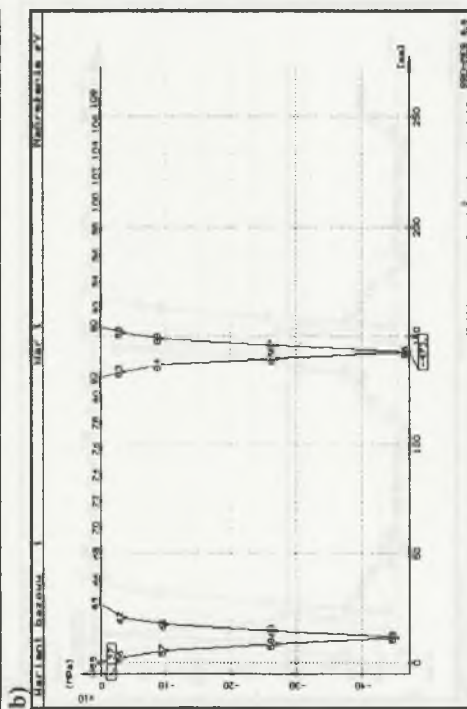
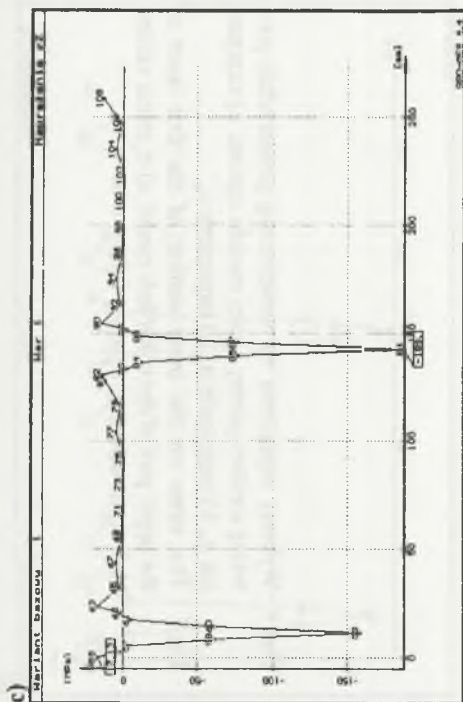
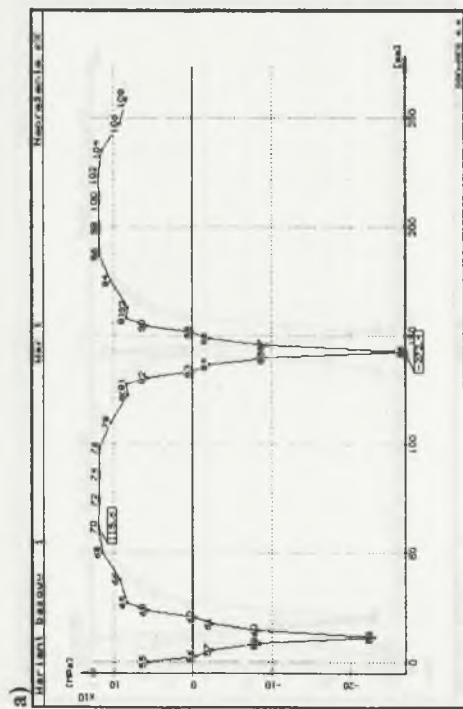


Rys. 5. Wykresy naprężenia na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy dolnej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .

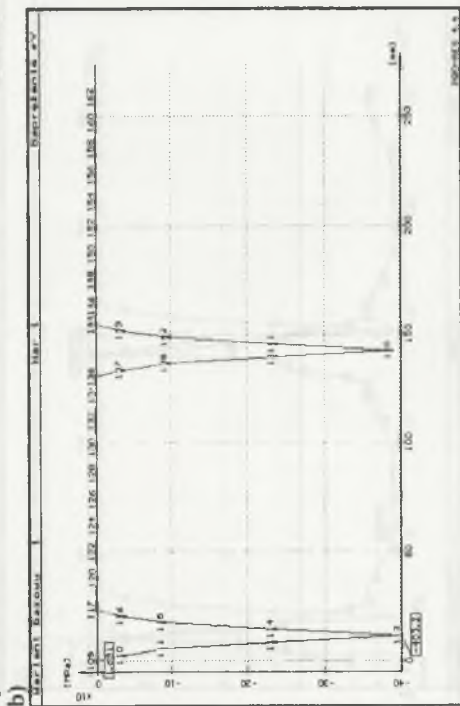
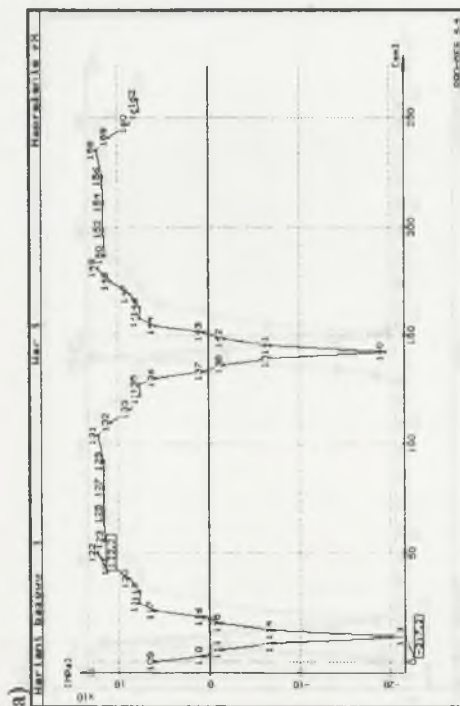
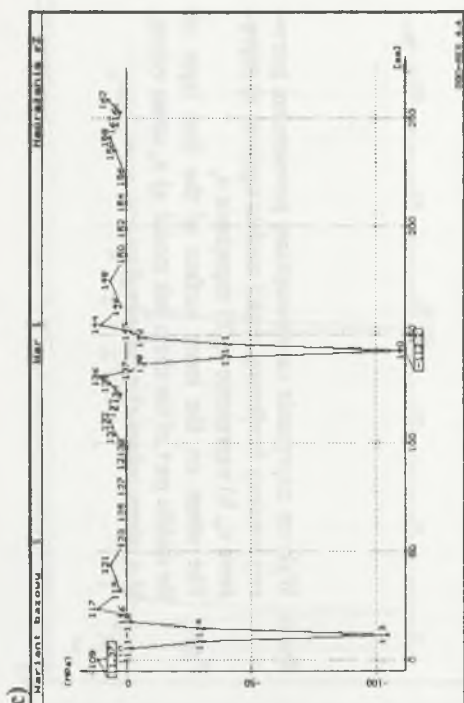
Fig. 5. The stress on the inner surface of the first layer of the lower part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



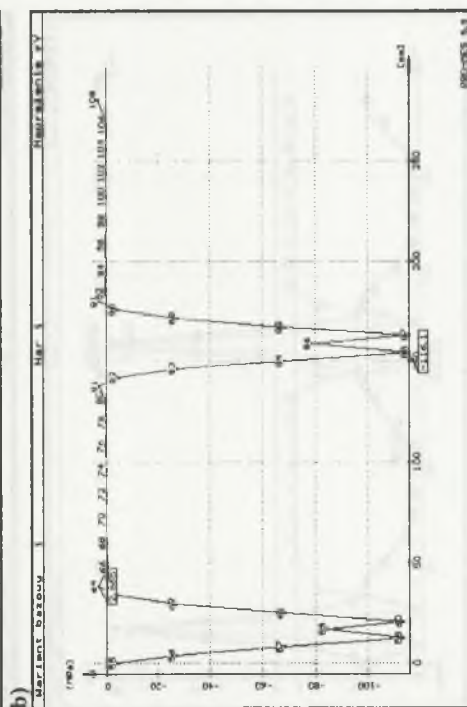
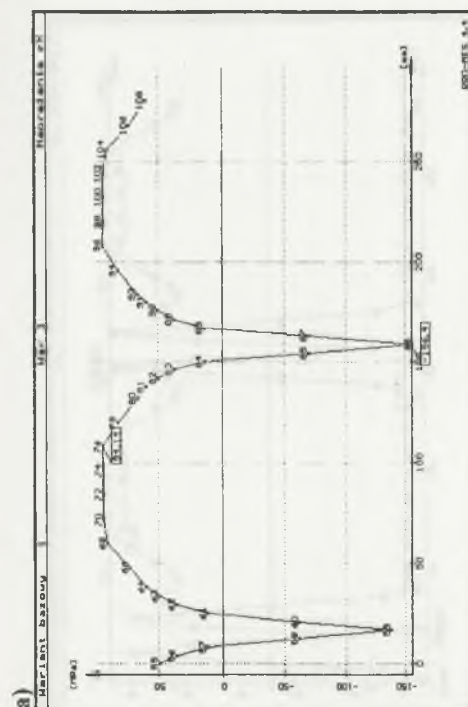
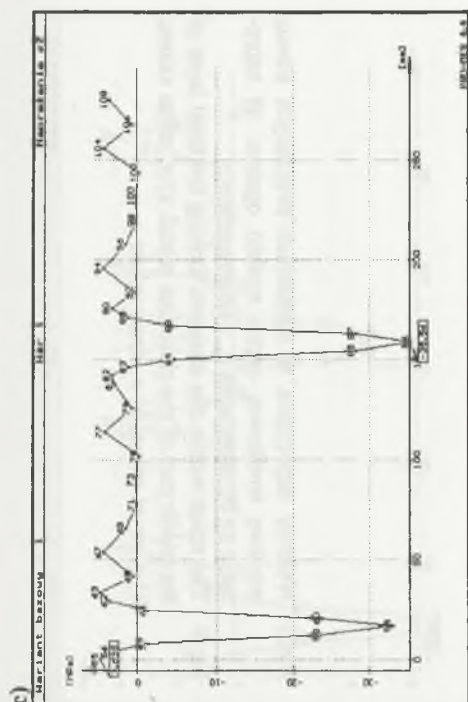




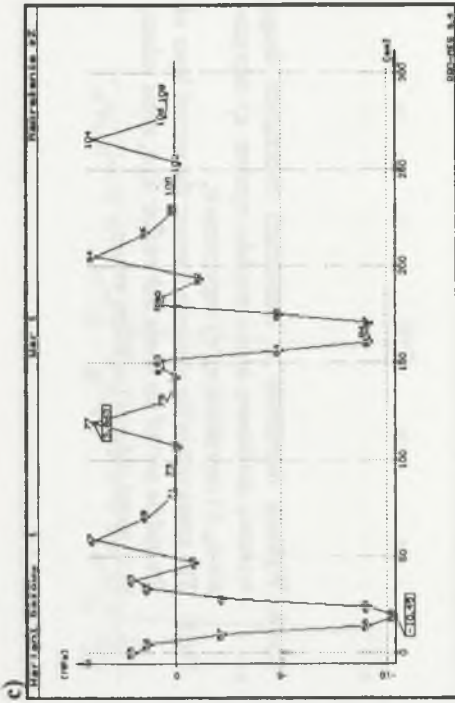
Rys. 6. Wykresy naprężenia na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .  
 Fig. 6. The stress on the inner surface of the first layer of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



Rys. 7. Wykresy naprężenia na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy górnej części modelu ognwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .  
 The stress on the inner surface of the first layer of the upper part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values

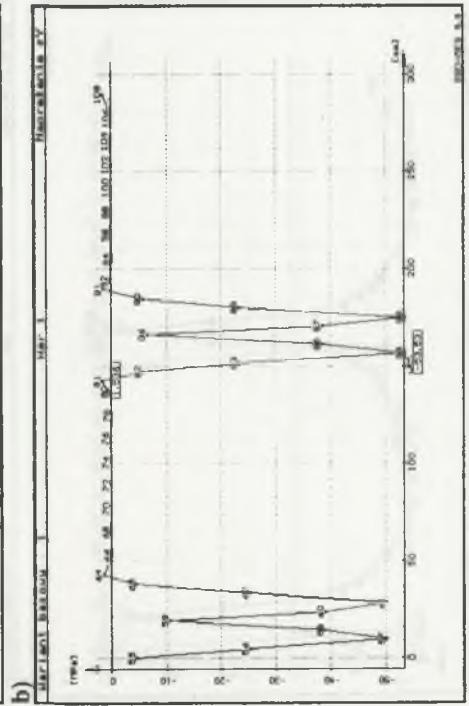
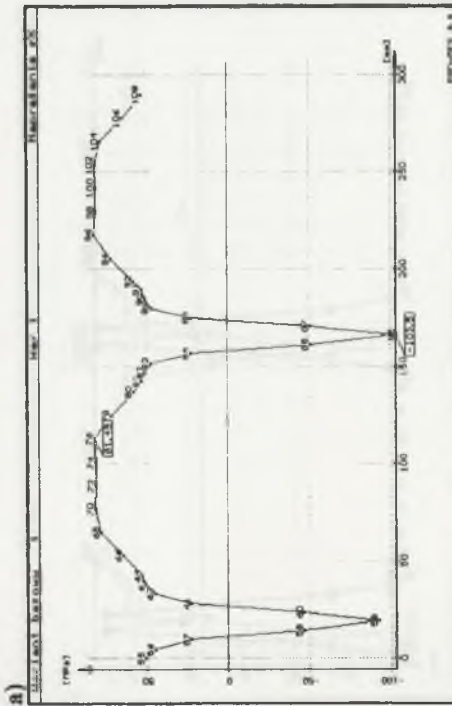


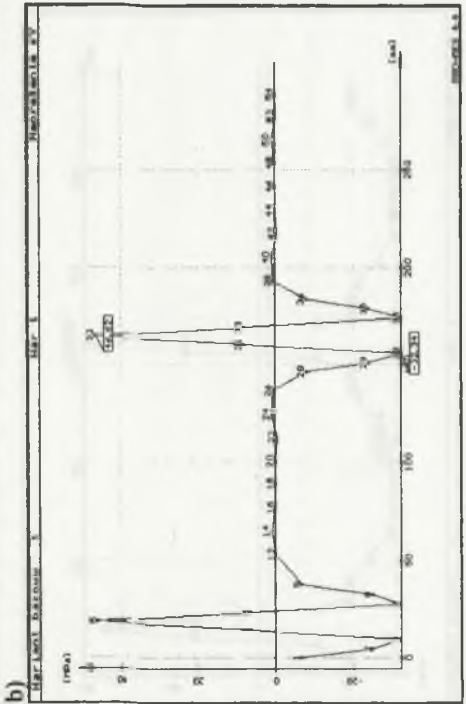
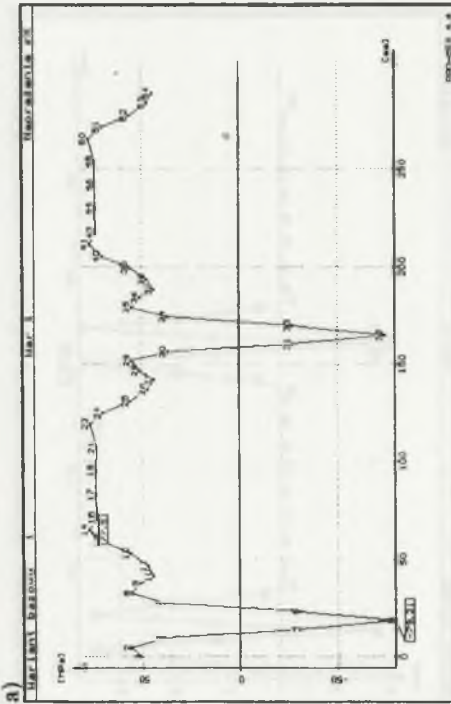
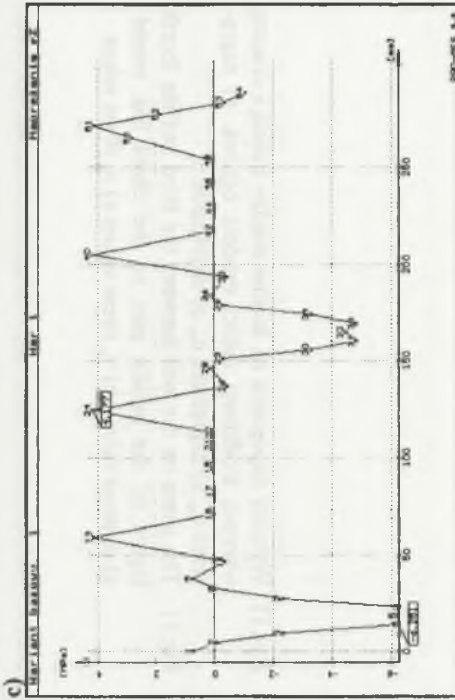
Rys. 8. Wykresy naprężenia w elementach tworzących drugą warstwę środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .  
 Fig. 8. The stress within the elements forming the second layer of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



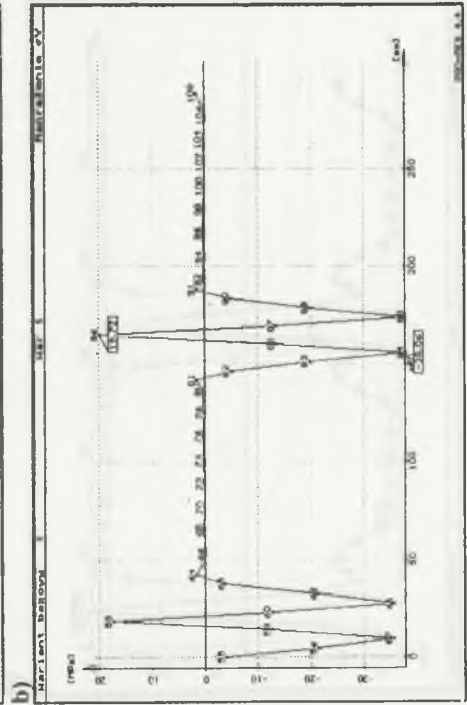
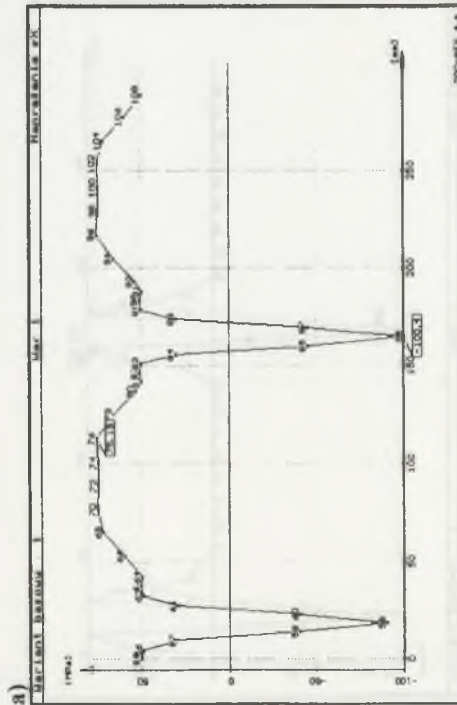
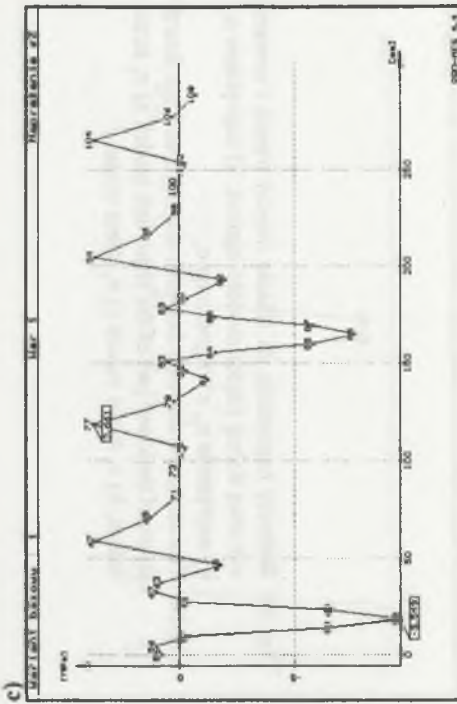
Rys.9. Wykresy naprężenia w elementach tworzących trzecią warstwę środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$

Fig.9. The stress within the elements forming the third layer of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values

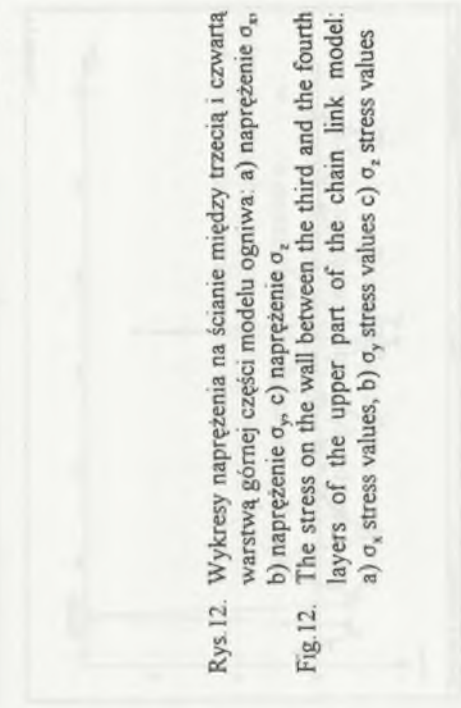
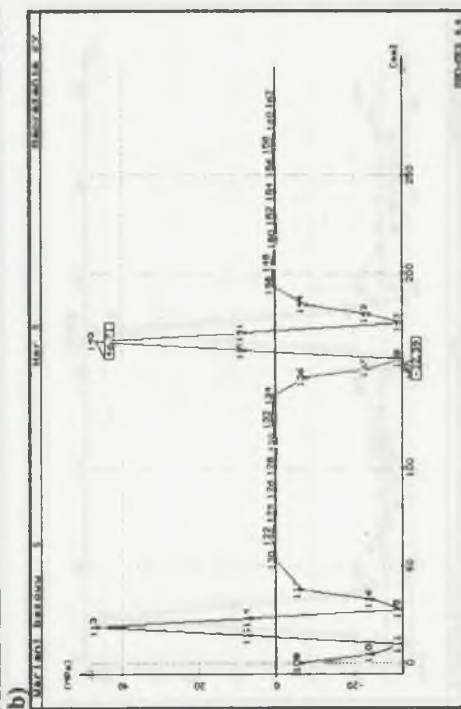
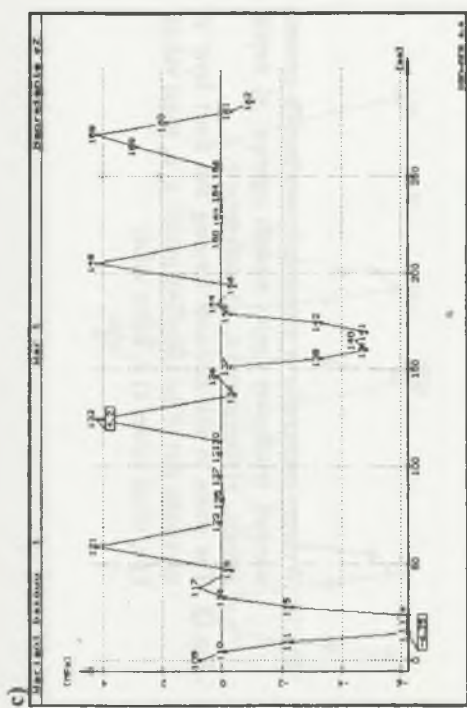
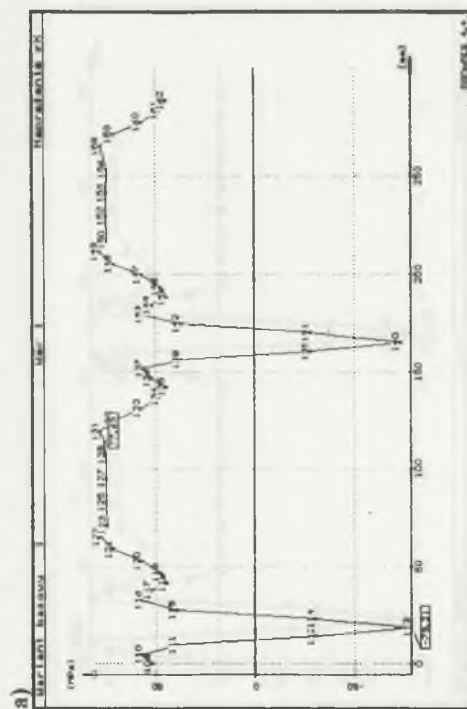




Rys. 10. Wykresy naprężenia na ścianie między trzecią i czwartą warstwą dolnej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .  
 Fig. 10. The stress on the wall between the third and the fourth layers of the lower part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values

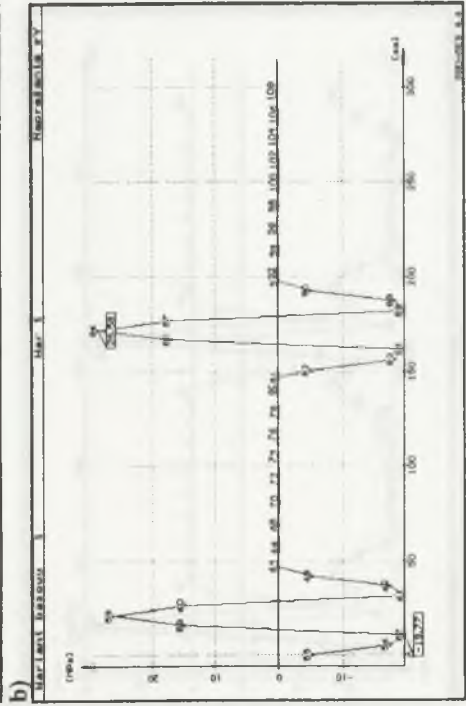
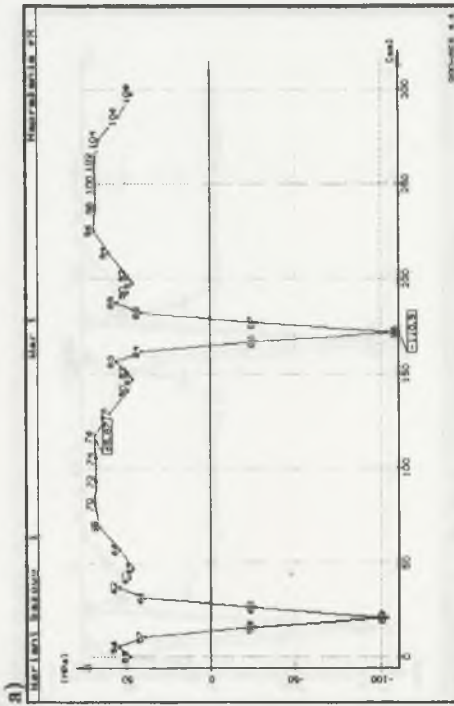
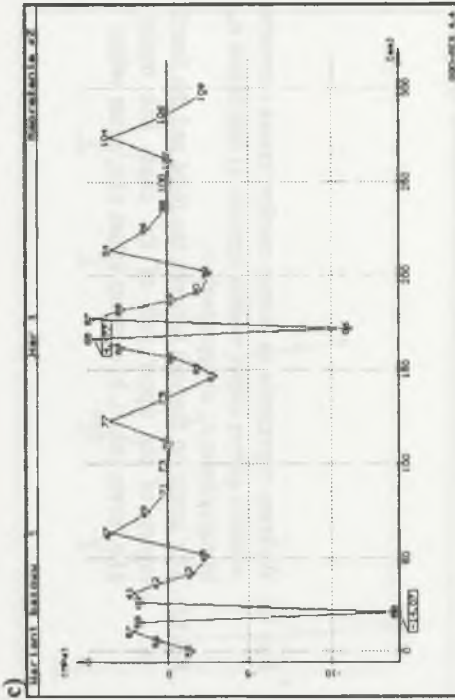


Rys. 11. Wykresy naprężenia na ścianie między trzecią i czwartą warstwą środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .  
 Fig. 11. The stress on the wall between the third and the fourth layers of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



Rys. 12. Wykresy naprężenia na ścianie między trzecią i czwartą warstwą górnej części modelu ogniwa. a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$

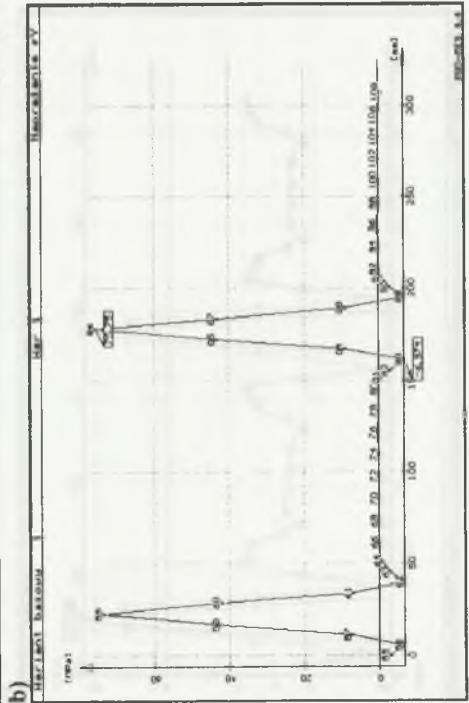
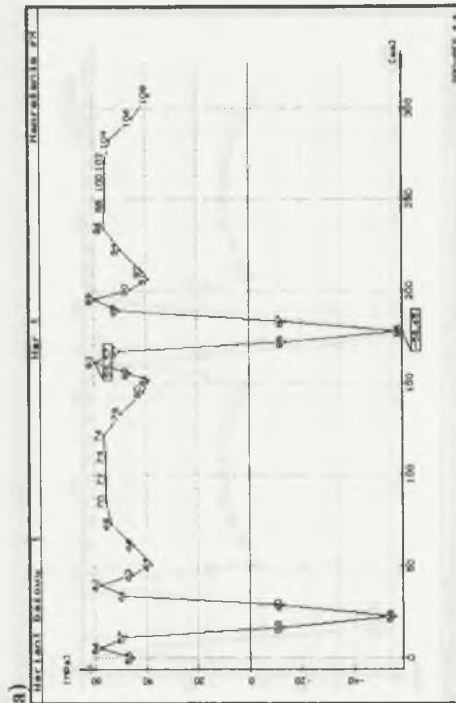
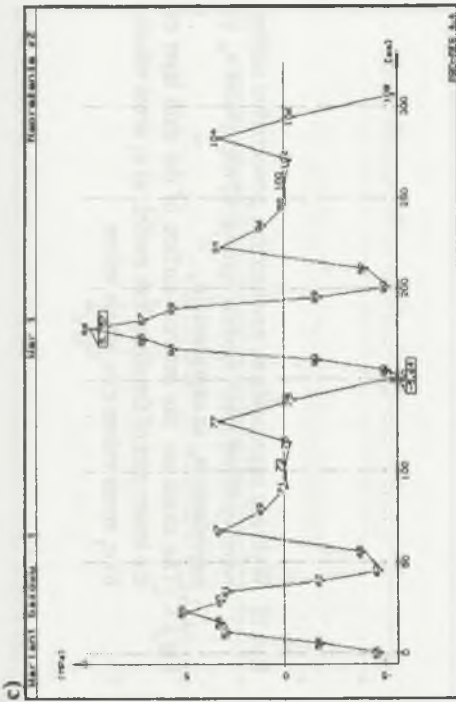
Fig. 12. The stress on the wall between the third and the fourth layers of the upper part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



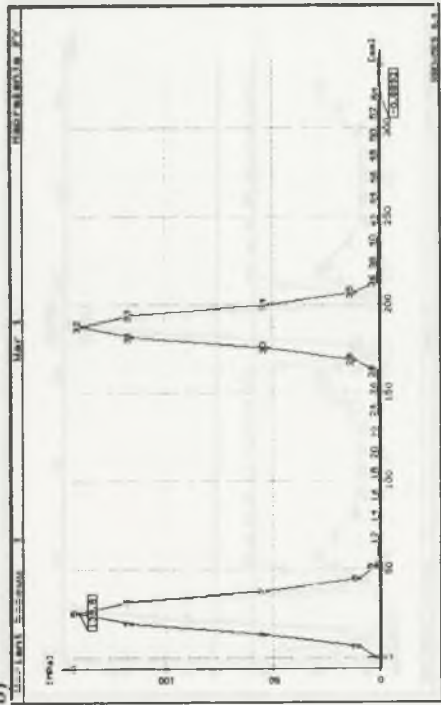
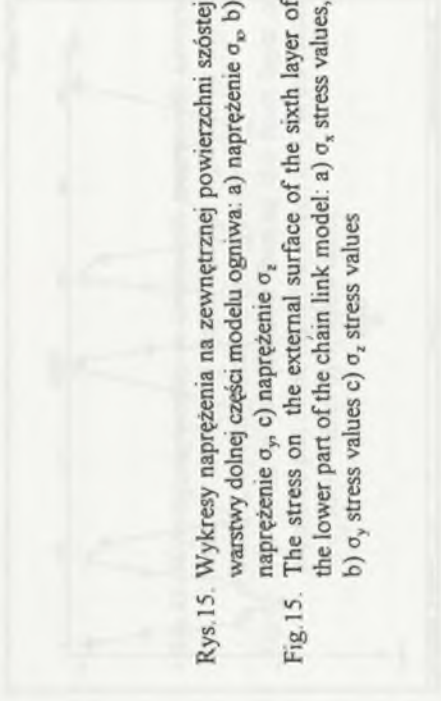
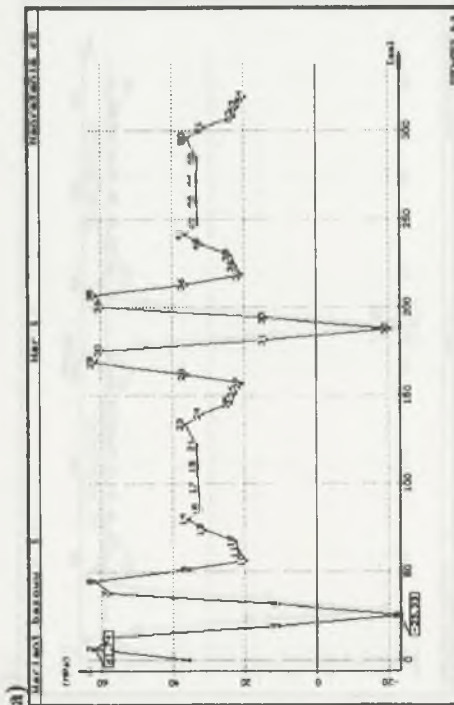
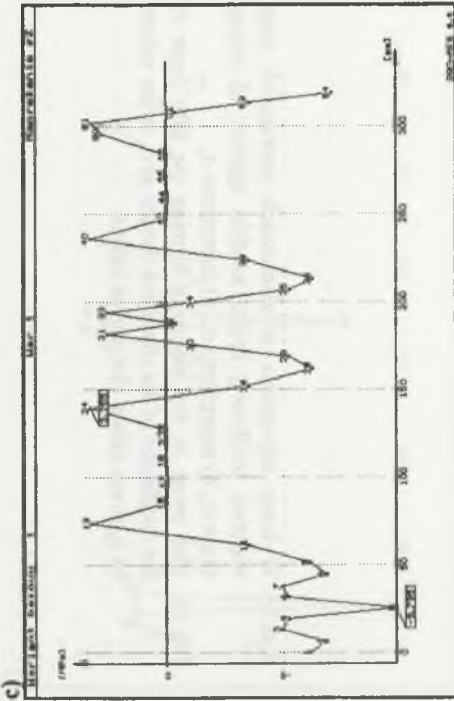
Rys. 13. Wykresy naprężenia w elementach tworzących czwartą warstwę środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$

Fig. 13. The stress in the elements forming the fourth layer of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values

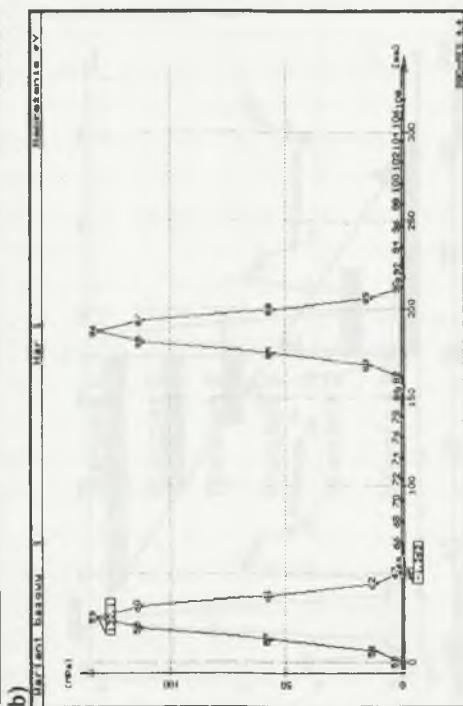
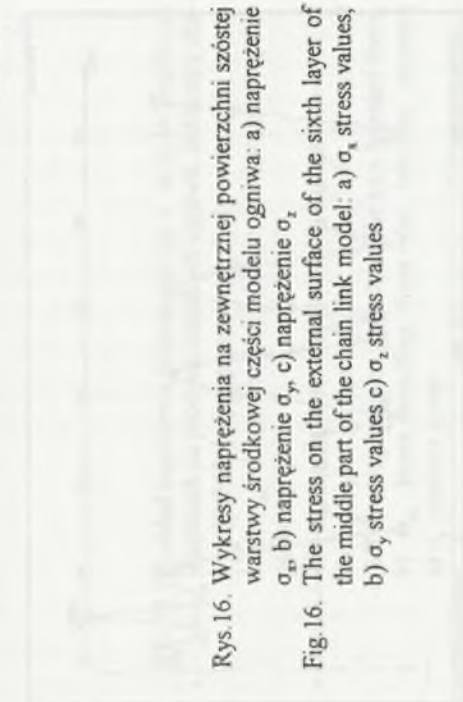
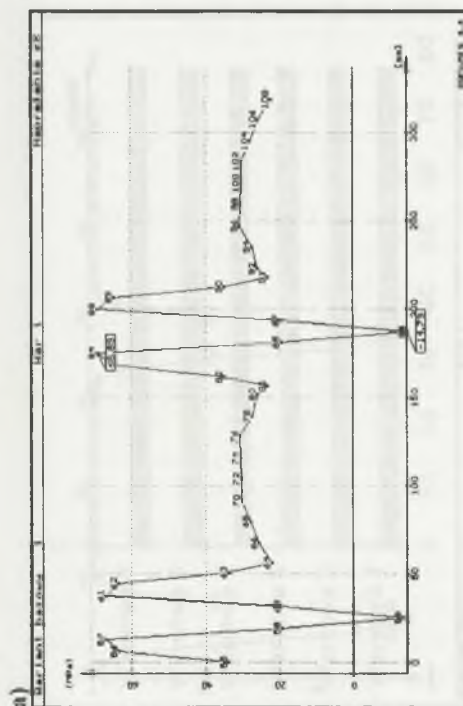
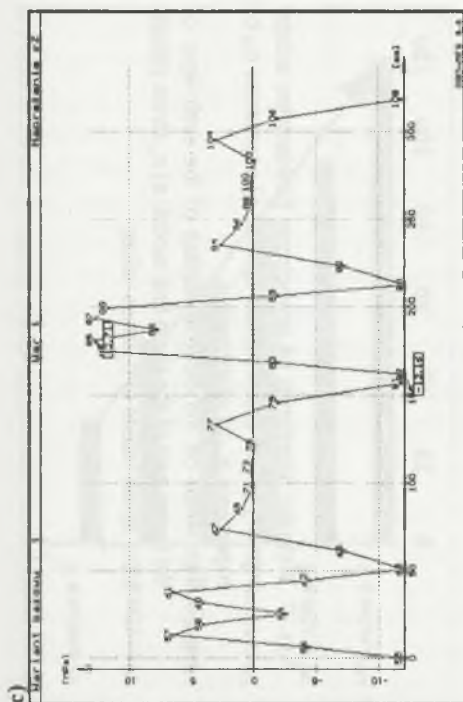




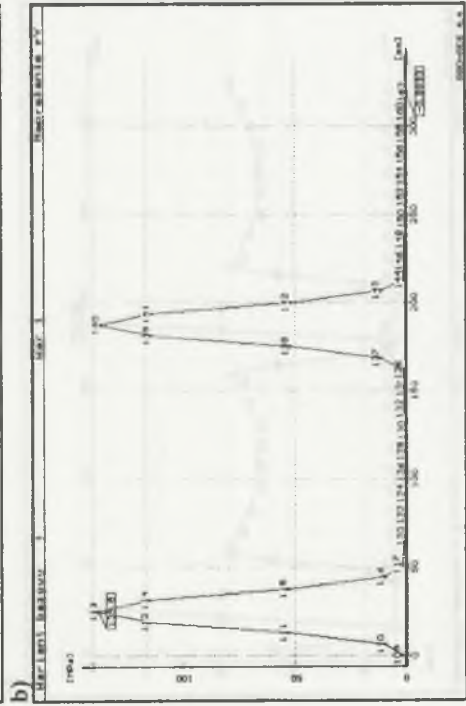
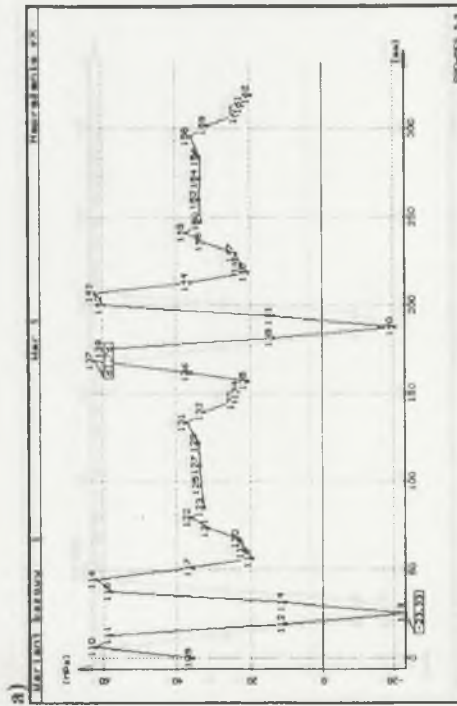
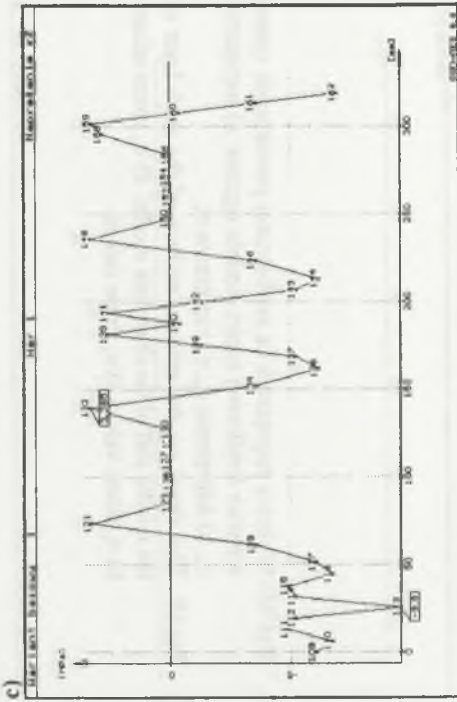
Rys. 14. Wykresy naprężenia w elementach tworzących piątą warstwę środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$ .  
 Fig. 14. The stress in the elements forming the fifth layer of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



Rys. 15. Wykresy naprężenia na zewnętrznej powierzchni szóstej warstwy dolnej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$   
 Fig. 15. The stress on the external surface of the sixth layer of the lower part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values

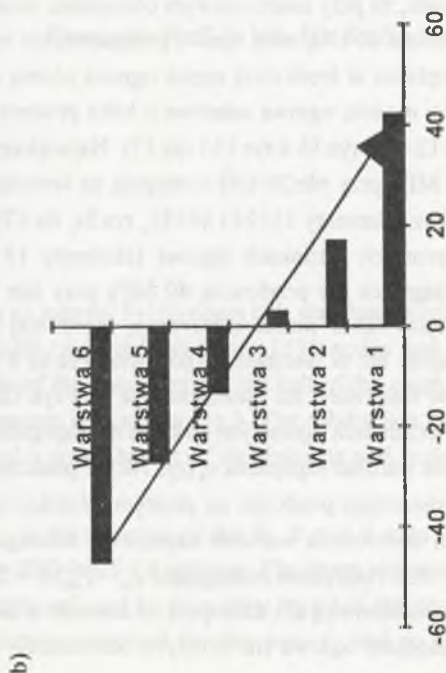
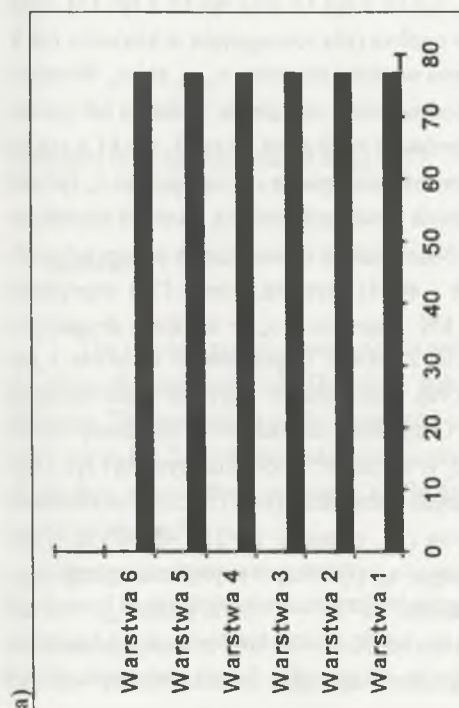
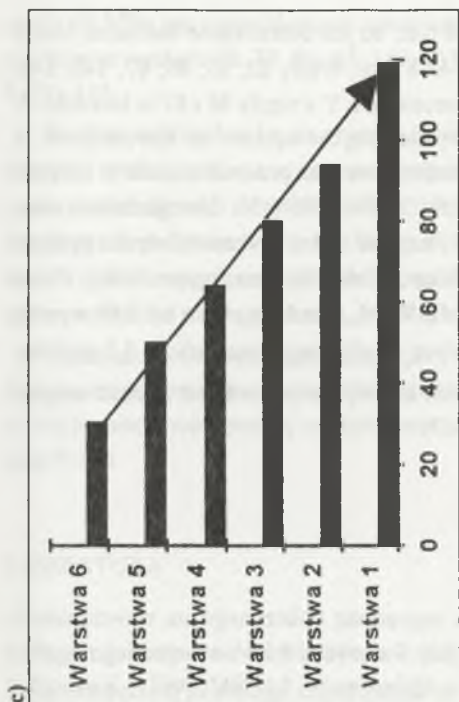


Rys. 16. Wykresy naprężenia na zewnętrznej powierzchni szóstej warstwy środkowej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$   
 Fig. 16. The stress on the external surface of the sixth layer of the middle part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



Rys. 17. Wykresy naprężenia na zewnętrznej powierzchni szóstej warstwy górnej części modelu ogniwa: a) naprężenie  $\sigma_x$ , b) naprężenie  $\sigma_y$ , c) naprężenie  $\sigma_z$

Fig. 17. The stress on the external surface of the sixth layer of the upper part of the chain link model: a)  $\sigma_x$  stress values, b)  $\sigma_y$  stress values c)  $\sigma_z$  stress values



Rys. 18. Rozkład naprężenia rozciągającego  $\sigma$  w poszczególnych warstwach na prostych odcinkach ogniwa. Jednostka skali osi X [MPa]: a) naprężenie  $\sigma_w$  od siły osiowej, b) naprężenie  $\sigma_{zg}$  od momentu zginającego, c) naprężenie  $\sigma_x$  wypadkowe

Fig. 18. The  $\sigma$  tensile stress distribution in the various layer of the straight section of the chain link. X axis unit [MPa]: a)  $\sigma_w$  stress as a results of the axis oriented force, b)  $\sigma_{zg}$  stress resulting from the bending moment c)  $\sigma_x$  resultant stress

Największa odległość między węzłami wynosi 6 mm, co jest dostatecznie dokładne, biorąc pod uwagę, iż całkowita długość modelu wynosi 142.8 mm. Węzły 32, 33, 86, 87, 140, 141, 194 i 195 podparto w kierunku osi X, węzeł 86 w kierunku osi Y a węzły 86 i 87 w kierunku Z. Taki układ podpór uniemożliwia przesunięcie wymienionych węzłów w kierunku osi X i uniemożliwia obrót modelu, a umożliwia obliczenie naprężenia oraz przemieszczenia w modelu. Zadano ciśnienie odpowiadające sile o wartości około 20 kN (19996 N). Uwzględniono masę modelu. Obliczono 349 bloków po 11 równań. Wymagana wolna pojemność dysku podczas obliczenia wyniosła 71,250 MB. Całkowity czas obliczenia modelu (czas optymalizacji + czas trwania obliczenia) na komputerze 486 DX2 66, 8MB RAM, speedrive około 6,5 MB wyniósł około 10 godzin. Obliczenia na Pentium 100 o podobnej konfiguracji trwały około 5,5 godziny.

Wyniki obliczeń w postaci wykresów naprężenia dla wybranych warstw i części modelu ogniwa są pokazane na rysunkach od numeru 5 do 17.

## 5. WNIOSKI

Z przeprowadzonej analizy rozkładu wartości naprężenia obliczonego na wewnętrznych i zewnętrznych powierzchniach oraz na ścianie między warstwami 3 i 4 wewnętrznego ogniwa łańcucha typu F-100 wynika, że wartości naprężenia w dolnej części ogniwa są praktycznie takie same jak w górnej części (porównaj rys.5 z rys.7, rys.10 z rys.12 oraz rys.15 z rys.17). Stąd wniosek, że przy znamionowym obciążeniu modelu ogniwa (siła rozciągająca w kierunku osi X o wartości 20 kN), masa ogniwa praktycznie nie zmienia wartości naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , ani  $\sigma_z$ . Wartości naprężenia w środkowej części ogniwa różnią się od wartości naprężenia w dolnej lub górnej części modelu ogniwa zaledwie o kilka procent (porównaj rys.6 z rys.5 i rys.7, rys.11 z rys.10 i rys.12 oraz rys.16 z rys.15 i rys.17). Największe wartości naprężenia rozciągającego  $\sigma_x$  (ponad 120 MPa przy sile 20 kN) występują na wewnętrznych powierzchniach na prostych odcinkach ogniwa (elementy 13÷24 i 40÷51, rys.5a, 6a i 7a). Natomiast na zewnętrznych powierzchniach na prostych odcinkach ogniwa (elementy 13÷24 i 40÷51, rys.15a, 16a i 17a) naprężenie rozciągające nie przekracza 40 MPa przy sile 20 kN. Naprężenie  $\sigma_x$  w warstwie drugiej jest mniejsze niż w warstwie pierwszej (porównaj rys.6a z rys.8a). Naprężenie w warstwie 3 jest mniejsze niż w warstwie 2 (porównaj rys.8a z rys.9a), naprężenie w warstwie 4 jest mniejsze niż w warstwie 3 itd. (porównaj rys.9a z rys.13a). Oczywiście, naprężenie  $\sigma_x$  na zewnętrznych powierzchniach ogniwa jest mniejsze niż naprężenie  $\sigma_x$  w warstwie 5 (porównaj rys.14a i rys.16a). Różne wartości naprężenia  $\sigma_x$  (rys.18c) w poszczególnych warstwach (rys.2 i rys.3) w określonym poprzecznym przekroju na prostym odcinku ogniwa (np. elementy 16÷21 i 43÷48) są wynikiem sumowania wartości naprężenia rozciągającego  $\sigma_{xr}$  (rys.18a) i naprężenia zginającego (rys.18b). Naprężenie rozciągające  $\sigma_{xr} = F_{xN}/A = 20 \text{ kN}/26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \approx 77 \text{ MPa}$ , gdzie  $F_{xN} = 20 \text{ kN}$  jest znamionową siłą działającą na łańcuch w kierunku osi X,  $A = 26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  jest poprzecznym przekrojem ogniwa (na prostych odcinkach). Naprężenie zginające o maksymalnej wartości

około 40 MPa jest spowodowane zginaniem elementów ogniwa wymuszonym przez podpory założone na węzłach 32, 33, 86, 87, 140, 141, 194 i 195 i przyłożeniem ciśnienia do elementów 5, 59 i 113.

Wartości naprężeń  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  na prostych odcinkach ogniwa są małe lub prawie zerowe. Wartości naprężeń ściskających  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  na powierzchniach wewnętrznych oraz naprężenia rozciągającego  $\sigma_y$  na powierzchniach zewnętrznych w miejscach przyłożenia ciśnienia (elementy 5, 59 i 113) i w miejscach podparcia (węzły 32, 33, 86, 87, 140, 141, 194 i 195) są duże (patrz. rys. 5b, 5c, 6b, 6c, 15b i 16b) i osiągają nawet 470 MPa (rys. 6b). Są to jednak naprężenia mniejsze niż minimalna wytrzymałość na rozciąganie stali, z której wykonany jest łańcuch, wynosząca około 690 MPa.

Wyznaczone wartości naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  w poszczególnych miejscach ogniwa będą przydatne do opracowania projektu przetwornika naprężenia zbudowanego na bazie ogniwa wewnętrznego, w celu pomiaru maksymalnej wartości naprężenia występującego podczas eksploatacji łańcucha typu F-100.

## LITERATURA

1. Poradnik inżyniera. Matematyka, t. 2. WNT, Warszawa 1987.
2. Grajek K.: PRO-MES4.3. Przewodnik po systemie. Gliwice 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan Kubisa

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 maja 1997

## Abstract

The tensile stress at chosen points within an internal F-100 chain link was determined by the finite elements method. The chain link model was subdivided into 1512 nodes and 972 elements. The numbering of the layers and nodes of the lower section, left half of the chain link is shown in Fig. 2, while the subdivision into elements is shown in Fig. 3. The subdivision of the chain link into sections is shown in Fig. 4a and a space layout of its elements and nodes is presented in Fig. 4b.

The tensile stress components  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  in the direction of the X, Y and Z axes were determined by the finite elements method using the PRO-MES 4.4 software. The stress values were calculated for the inner and outer surfaces, the middle wall and for four inner layers of the internal F-100 chain link model. The results of calculations executed for the  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  stress

components are presented in Fig 5÷17. The analysis conducted shows that on the straight sections of the chain link, the  $\sigma_x$  stress values of the inner surface are approximately three times larger than those of the corresponding outer surfaces. The maximum calculated stress value (approximately 470 MPa) is lower than the minimum tensile strength of the steel (approximately 690 MPa) from which the F-100 chain link is made. The  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  stress values calculated will be used to develop a stress transducer based on the internal F-100 chain link (Fig 18).