ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1998
Seria: ELEKTRYKA z. 162 Nr kol. 1395

Józef PARCHAŃSKI
Dwayne DAVID
Politechnika Śląska

ZMODYFIKOWANE OGNIWO TYPU F-100 JAKO PRZETWORNIK NAPRĘŻENIA I SIŁY

Streszczenie. Metodą elementów skończonych obliczono wartość naprężenia σ_x w kierunku osi X modelu ogniwa typu F-100 ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi. Wykonano przetwornik naprężenia σ_x i siły F działającej w osi ogniwa oraz przeprowadzono jego badania laboratoryjne. Wyniki doświadczalne porównano z wynikami badań symulacyjnych podanych w artykułach [1], [2], [3] oraz w tej pracy. Wyznaczono współczynniki umożliwiające obliczenie naprężenia w ogniwie oryginalnym na podstawie pomiarów napięcia U_1 i U_2 przetwornika naprężenia.

A MODIFIED F-100 CHAIN LINK AS A STRESS AND FORCE TRANSDUCER

Summary. The σ_x stress values in the direction of the X axis of an F-100 chain link model, milled on its internal walls, were calculated using the finite element method. A transducer used to measure the stress σ_x and force F acting along the axes of the chain link was developed and tested in the laboratory. The results of these laboratory tests were then compared with the results of computer simulations as given in papers [1], [2], [3] as well as in this paper. Coefficients which enable the calculation of the stress in the original chain link on the basis of the U_1 and U_2 of the stress transducer were determined.

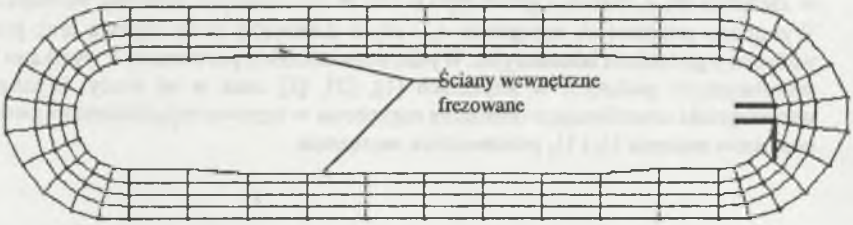
1. WSTĘP

Jak wyjaśniono w artykule [1], pęknięcie ogniwa łańcucha pociągowego powoduje zatrzymanie przenośnika i przerwę w produkcji, która jest przyczyną dużych strat zakładu produkującego samochody. Aby określić bezpośrednią przyczynę zerwania łańcucha, należy zmierzyć wartość siły działającej w łańcuchu w każdym miejscu toru przenośnika oraz zmierzyć największe wartości naprężenia w ogniwie. Podczas przemieszczania się ogniwa po rolkach na jego ściany zewnętrzne, dolne lub górne działają duże naciski. Jedynie wewnętrzne ściany wewnętrznego ogniwa łańcucha nie są na nie narażone. Umożliwia to wykonanie przetwornika naprężenia σ i siły F, np. przez naklejenie tensometrów na wewnętrznych ścianach ogniwa.

Aby zabezpieczyć naklejone tensometry przed uszkodzeniem mechanicznym, a równocześnie umożliwić montaż tak wykonanego przetwornika w łańcuchu, sfrezowano wewnętrzne ściany ogniwa, zdejmując warstwę o grubości około 0,65 mm. Po naklejeniu tensometrów na sfrezowanych powierzchniach zabezpieczono je za pomocą cienkiej blachy przed uszkodzeniem podczas montażu ogniwa w łańcuchu badanym.

Sfrezowanie wewnętrznych ścian ogniwa zmienia jego kształt i przekrój poprzeczny. Staje się on inny niż w przypadku ogniwa oryginalnego analizowanego w pracach [1], [2] i inny niż w przypadku ogniwa dwustronnie sfrezowanego – badanego w pracy [3].

Zatem, podobnie jak w pracach [1], [2] i [3], opracowano model cyfrowy ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi, jak to pokazano na rys.1.



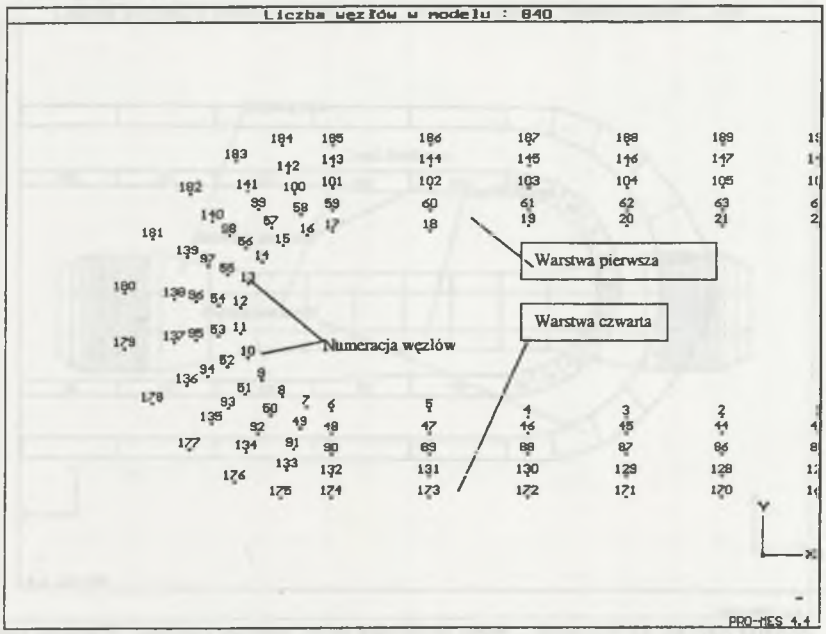
Rys.1. Widok ogniwa z dołu, pokazujący miejsca sfrezowanych ścian wewnętrznych
Fig.1. Bottom view of chain link showing the milled internal walls

2. WYNIKI KOMPUTEROWEJ SYMULACJI NAPRĘŻENIA ROZCIĄGAJĄCEGO W WYBRANYCH MIEJSCACH OGNIWA ZE SFREZOWANYMI ŚCIANAMI WEWNĘTRZNYMI

Dla skrócenia czasu obliczeń cyfrowy model ogniwa podzielono na 4 warstwy (rys.2) zamiast na 6 warstw jak w pracach [1], [2] i [3]. Model jednostronnie sfrezowanego wewnętrznego ogniwa F-100 podzielono na 504 elementy i określono 840 węzłów. Podparto 8 węzłów i zadano ciśnienie odpowiadające sile 20 kN, działającej na elementy 11, 53 i 92 tworzące wewnętrzną powierzchnię na łuku ogniwa.

Rysunki 1 ÷ 4 przedstawiają podział i numerację wybranych elementów, węzłów, warstw i części modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi.

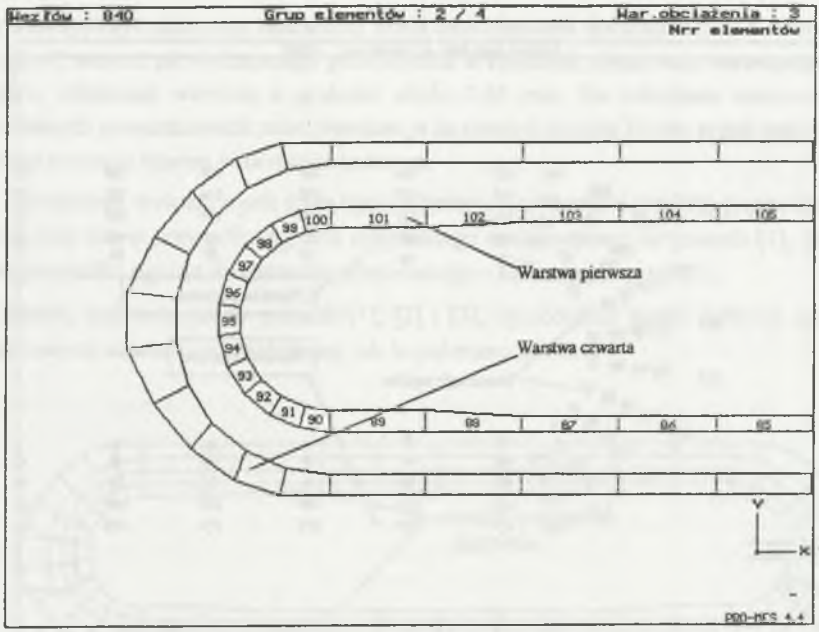
Przekrój poprzeczny wewnętrznie sfrezowanych prostych odcinków modelu ogniwa jest o około 7,1% mniejszy niż przekrój poprzeczny prostych odcinków modelu ogniwa oryginalnego.



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

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

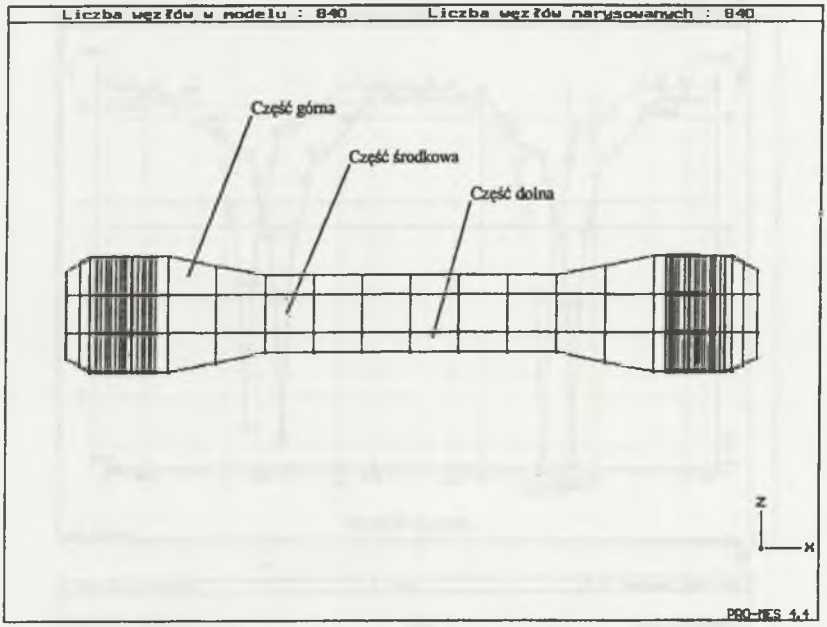
W pracy [1] wykazano, że wartości naprężeń rozciągających σ_y w kierunku osi Y i σ_z w kierunku osi Z na prostych odcinkach są małe lub prawie zerowe. Naprężenie σ_x w górnej części ogniwa ma praktycznie takie same wartości jak w części dolnej. W pracy [2] wykazano, że wartości naprężeń ścinających τ_{xy}, τ_{yz} i τ_{zx} nie mają znaczącego wpływu na trwałość ogniwa typu F-100. Również rozłożenie wartości naprężenia redukowanego wg hipotezy Hubera nie odzwierciedla rozłożenia miejsc pękania ogniwa. Największy wpływ na awaryjność łańcucha ma naprężenie rozciągające σ_x działające w osi X, zgodnej z osią symetrii ogniwa. Z tych względów w tym artykule na rys.5 i 6 przedstawiono tylko wykresy σ_x na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni części dolnej i środkowej ogniwa F-100 ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi.



Rys.3. Podział ogniwa na elementy – część środkowa lewej połowy ogniwa. Warstwa pierwsza ponumerowana – dla pozostałych warstw układ jest identyczny. Elementy od 1÷ 42 – część dolna, 43÷84 – część środkowa, 85÷126 – część górna

Fig.3. Subdivision of the chain link into elements – the lower part of the left half is shown. The first layer is numbered – the layout of the remaining layers is identical. Elements no. 1÷42 form the lower part, 43÷84 form the middle part and 85÷126 form the upper part of the chain link

Z porównania wartości naprężenia rozciągającego σ_x obliczonych dla modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi (rys.5 i 6) z wartościami σ_x obliczonymi dla modelu ogniwa oryginalnego przedstawionymi w pracy [1] na rys. 5a, 6a, 15a i 16a wynika, że naprężenie σ_x w miejscach podparcia i miejscach działania ciśnienia na ogniwo ma praktycznie takie same wartości. Natomiast wartość naprężenia rozciągającego σ_x na powierzchni wewnętrznej na prostych odcinkach modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi są większe niż w ogniwie oryginalnym o około 11% w części dolnej oraz około 9% w części środkowej. Odpowiednio wartości naprężenia σ_x na ścianie między warstwami drugą i trzecią modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi są większe niż w ogniwie oryginalnym o 11,4% w części dolnej oraz o około 10% w części środkowej. Naprężenie σ_x na zewnętrznej powierzchni modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi są mniejsze niż w ogniwie oryginalnym o około 1,5% w części dolnej oraz mniejsze o około 3% w części środkowej.

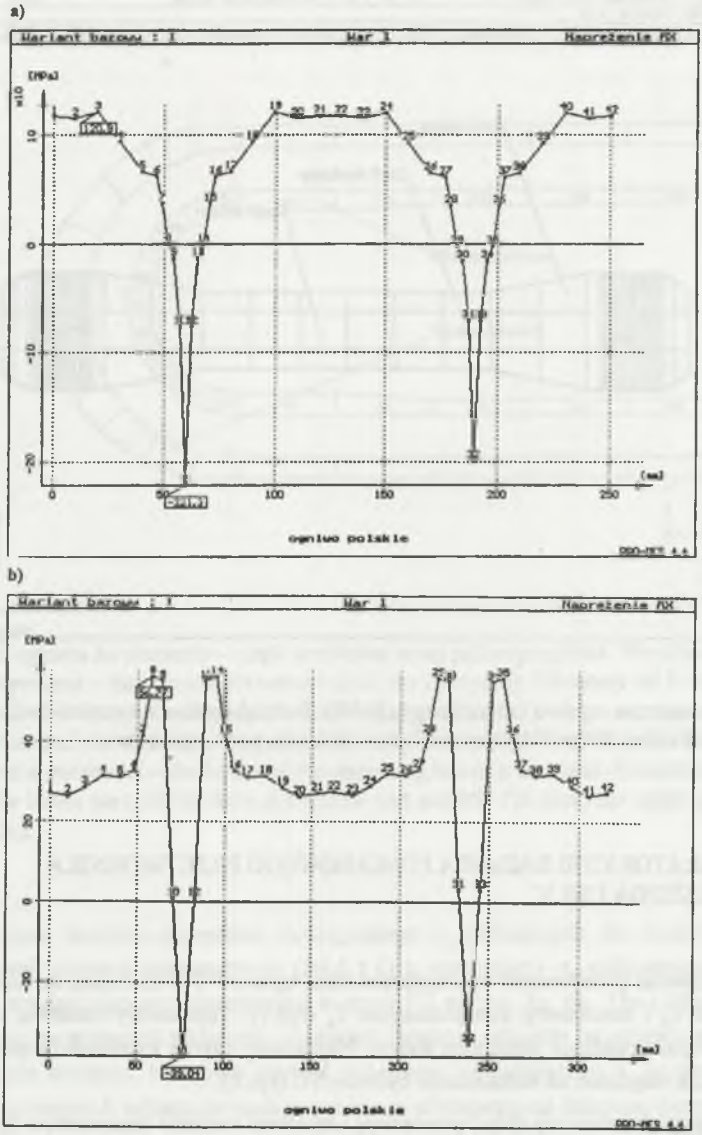


Rys.4. Wewnętrzne ogniwo łańcucha typu F-100. Podział ogniwa na części – widok z boku
Fig.4. Subdivision of the F-100 internal chain link into parts – side view

3. LABORATORYJNE BADANIA POMIAROWEGO PRZETWORNIKA NAPRĘŻENIA I SIŁY

Po oszlifowaniu sfrezowanych wewnętrznych ścian ogniwa F-100 naklejano na nich tensometry pomiarowe T_p i tensometry kompensacyjne T_k (rys.7). Tensometry stanowią rezystancyjne dzielniki napięcia zasilane napięciem stałym. Napięciowy sygnał z dzielników poprzez układy elektroniczne włączono na woltomierze cyfrowe VC (rys.8).

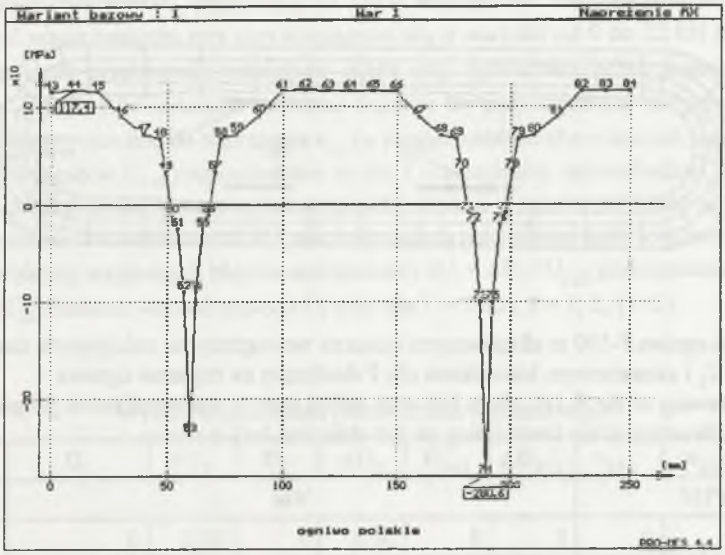
Wykonany elektroniczny układ pomiarowy umożliwia zasilanie tensometrów typu RL 120/6 napięciem stałym U = 4,98 ± 0,01 V. Wykonane dwa wzmacniacze pomiarowe umożliwiają jednakowe wzmocnienie K_u = 1000 ± 1 napięć na wyjściach obu dzielników napięcia. Zatem czułość obu układów jest jednakowa — $S_1 = S_2 = S$.



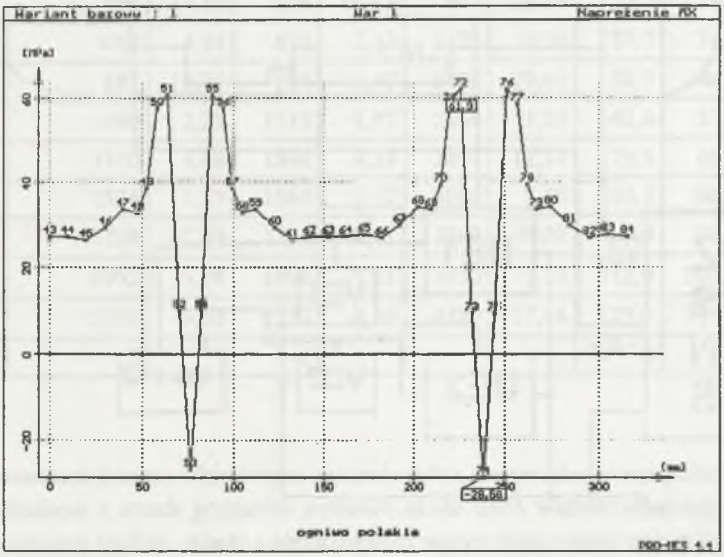
Rys.5. Wykresy naprężenia rozciągającego σ_x dolnej części cyfrowego modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi: a) na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy, b) na zewnętrznej powierzchni czwartej warstwy

Fig.5. The longitudinal stress σ_x in the lower part of the digital chain link model, milled on its internal walls: a) stress on the internal surface of the first layer, b) stress on the external surface of the fourth layer

a)

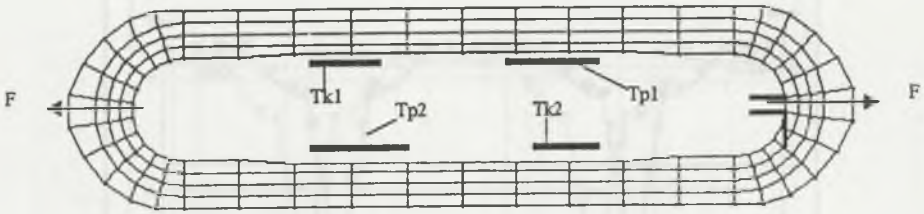


b)



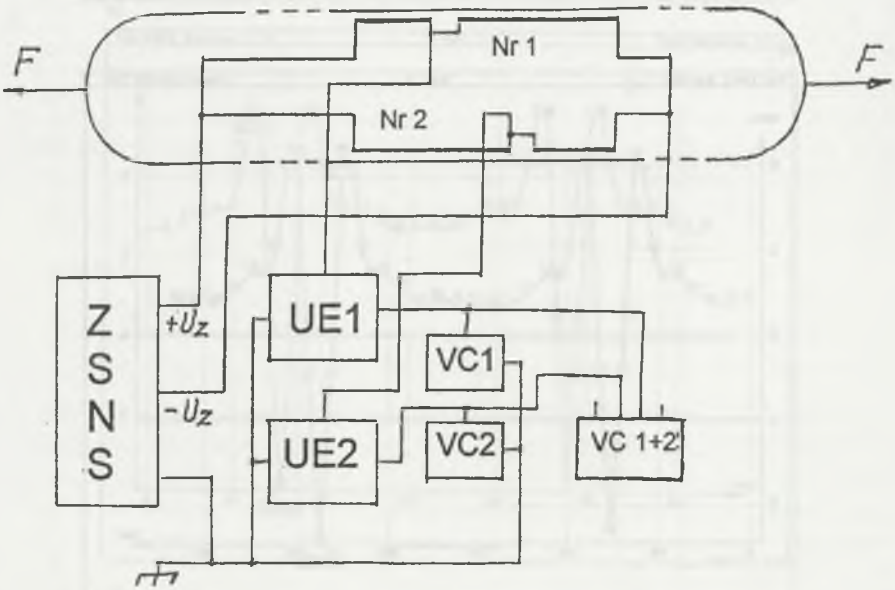
Rys.6. Wykresy naprężenia rozciągającego σ_x środkowej części cyfrowego modelu ogniwa ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi: a) na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy, b) na zewnętrznej powierzchni czwartej warstwy

Fig.6. The longitudinal stress σ_x in the middle part of the chain link model, milled on its internal walls: a) stress on the internal surface of the first layer, b) stress on the external surface of the fourth layer



Rys.7. Szkic ogniwa F-100 ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi, naklejonymi tensometrami T_p i T_k i zaznaczonym kierunkiem siły F działającej na trzpienie ogniwa

Fig.7. A drawing of the F-100 chain link with milled internal walls and stress gauges attached. The direction of the force acting on the chain link bolt is shown



Rys 8. Idea uniwersalnego układu elektrycznego do wzorcowania przetwornika pomiarowego oraz do pomiarów naprężenia σ_1 i σ_2 oraz siły F rozciągającej ogniwo

Fig.8. A universal electrical circuit used to calibrate the transducer as well as to measure the σ_1 and σ_2 stresses and force F acting longitudinally on the chain link

Wykonany przetwornik, zbudowany na bazie wewnętrznie sfrezowanych ścian ogniwa F-100, przed wzorcowaniem trzy razy rozciągano siłą o wartości od 0 do 22 kN (tzw. trenowanie). Następnie przetwornik rozciągano znaną siłą, wytwarzaną przez maszynę wytrzymałościową ZD-10. Równocześnie mierzono napięcie U_1 proporcjonalne do naprężenia σ_{x1}, napięcie U_2 proporcjonalne do naprężenia σ_{x2} na powierzchniach sfrezowanych wewnętrznych ścian ogniwa i napięcie U_{1+2} proporcjonalne do siły F rozciągającej osiowo badany przetwornik pomiarowy. Średnie arytmetyczne wartości napięć U_i z trzech wyników pomiarowych i wartości bezwzględnych błędów nieliniowości ΔU_i obliczone metodą najmniejszej sumy kwadratów podano w tabeli 1. Wykresy względnych błędów nieliniowości $\delta U_i = \Delta U_i / U_{i\,20}$ przedstawiono na rys.9, przy czym U_{i20} oznacza wartość napięcia U_i przy sile F = 20kN, I = 1, 2, (1+2).

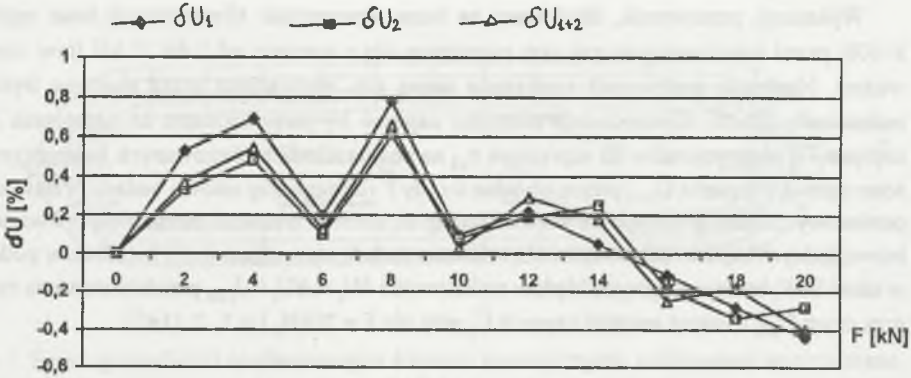
Tabela 1

Wyniki wzorcowania przetwornika pomiarowego

Lp.	F	U_1	ΔU_1	U_2	ΔU_2	U_{1+2}	ΔU_{1+2}	$\sigma_{x1p.}$	σ_{x10}	σ_{x40}
	kN	mV						MPa		
1	0	0	0,00	0	0,00	0	0	0	0	0
2	2	229	11,45	230	7,37	456	16,25	13,0	11,9	3,13
3	4	450	14,89	456	10,75	903	23,50	25,7	23,6	6,19
4	6	657	4,34	670	2,12	1325	5,76	37,7	34,6	9,09
5	8	887	16,79	904	13,50	1788	29,01	50,9	46,7	12,3
6	10	1090	2,23	1115	1,87	2200	1,26	62,6	57,4	15,1
7	12	1310	4,68	1340	4,24	2651	12,51	75,3	69,1	18,1
8	14	1524	1,13	1564	5,62	3086	7,76	87,7	80,4	21,1
9	16	1738	-2,43	1777	-4,01	3507	-10,98	99,9	91,6	24,1
10	18	1952	-5,98	1996	-7,63	3950	-7,73	112,0	103,0	27,0
11	20	2166	-9,53	2220	-6,26	4380	-17,48	125,0	115,0	30,1
12	0	2		-1		1		0		

Przeprowadzone pomiary laboratoryjne wykazały dobrą powtarzalność wyników (odchylenie średniokwadratowe z trzech pomiarów wynosiło około 0,6% wartości średniej). Wykazały także zadowalającą czułość układu i niezauważalny wpływ temperatury otoczenia na wyniki pomiarów w zakresie od 10°C do 30°C.

Różnice między wartościami napięcia U_1 a U_2 są spowodowane różnymi polami powierzchni przekroju poprzecznego wewnętrznie sfrezowanych prostych odcinków obu połówek ogniwa, na bazie którego wykonano pomiarowy przetwornik naprężenia i siły. Przyczynę różnych wymiarów wyjaśniono w artykule [4].



Rys.9. Wykresy względnych błędów nieliniowości δU_1, δU_2, δU_{1+2} napięć U_1, U_2, U_{1+2} w funkcji siły F rozciągającej przetwornik pomiarowy

Fig.9. Graphs of the relative non-linearity error δU_1, δU_2, δU_{1+2} of the voltages U_1, U_2 and U_{1+2} against the force F acting longitudinally on the measuring transducer

Średnia wartość naprężenia rozciągającego σ_{xavp} w kierunku osi X w przetworniku pomiarowym przy sile F wynosi

$$\sigma_{xavp} = \frac{F}{A_p}, \tag{1}$$

przy czym A_p jest zmierzonym polem powierzchni przekroju poprzecznego w środkowej części prostych odcinków ogniwa F-100 ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi i wynosi 260 mm^2.

Współczynnik N_{1sp} określający stosunek naprężenia σ_{x1sp} na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy przetwornika pomiarowego (rys.6a) do naprężenia średniego σ_{xavsp} w metodzie symulacyjnej (indeks s) wynosi

$$N_{1sp} = \frac{\sigma_{x1sp}}{\sigma_{xavsp}}. \tag{2}$$

Określając z wykresów pracy [1] wartość naprężenia rozciągającego σ_{xso} w określonym miejscu ogniwa oryginalnego przy danej sile F oraz wartość naprężenia σ_{x1sp}, można obliczyć współczynnik pomiarowy K_{sp} ze wzoru

$$K_{sp} = \frac{\sigma_{xso}}{\sigma_{xsp}}. \tag{3}$$

Na przykład współczynnik K_{1sp} wyznaczony metodą symulacyjną

$$K_{1sp} = \frac{\sigma_{x1so}}{\sigma_{s1sp}}, \tag{4}$$

wyraża stosunek naprężenia rozciągającego σ_{x1so} na wewnętrznych powierzchniach modelu ogniwa oryginalnego do naprężenia σ_{x1sp} na wewnętrznych powierzchniach modelu przetwornika pomiarowego ze sfrezowanymi ścianami wewnętrznymi. Współczynnik

$$K_{4sp} = \frac{\sigma_{x4so}}{\sigma_{x1sp}}, \tag{5}$$

wyraża stosunek naprężenia σ_{x4so} na zewnętrznych powierzchniach modelu ogniwa oryginalnego do naprężenia σ_{x1sp}.

Czułość $S_{\sigma x1sp}$ pomiarowego przetwornika naprężenia, czyli stosunek średniej wartości napięcia U_1 i U_2 na wyjściu przetwornika do średniej wartości naprężenia σ_{x1p} na wewnętrznych ścianach przetwornika pomiarowego

$$S_{\sigma x1p} = \frac{U_{1,2av}}{\sigma_{x1p}}, \tag{6}$$

obliczona na podstawie wzorów (1), (2) i (6) wynosi

$$S_{\sigma x1p} = \frac{A_p}{F} \cdot \frac{\sigma_{xavsp}}{\sigma_{x1sp}} \cdot \frac{U_1 + U_2}{2}. \tag{7}$$

Na przykład, przy sile F = 20 kN ze wzoru (1) otrzymuje się

$$\sigma_{xavp} = F / A_p = 20.10^3 / 260 \,.\, 10^{-6} = 76{,}9 \text{ MPa}.$$

Z wykresu podanego na rys.6a wyznacza się odpowiedające sile F = 20 kN naprężenie na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy σ_{x1sp} = 116 MPa oraz naprężenie na zewnętrznej powierzchni czwartej warstwy σ_{x4sp} = 27,1 MPa. Średnia wartość naprężenia w przetworniku pomiarowym wynosi

$$\sigma_{xavsp} = (\sigma_{x1sp} + \sigma_{x4sp}) / 2 = (116 + 27{,}1) / 2 \approx 71{,}6 \text{ MPa}.$$

Ze wzoru (2) oblicza się współczynnik

$$N1sp = (\sigma_{x1sp} / \sigma_{xavsp}) = (116 / 71{,}6) = 1{,}62.$$

Z analogicznego wykresu jak podany w pracy [1] na rys.6a, lecz obliczonego dla modelu czterowarstwowego, wyznacza się odpowiadające sile F = 20 kN naprężenie σ_{x1so} = 106,4 MPa

na wewnętrznych powierzchniach oraz naprężenie σ_{x4so} = 27,9 MPa na zewnętrznych powierzchniach modelu ogniwa oryginalnego.

Ze wzoru (4) oblicza się współczynnik

$$K_{1sp} = (\sigma_{x1so} / \sigma_{x1sp}) = (106,4 / 116) = 0,917,$$

a ze wzoru (5) współczynnik

$$K_{4sp} = (\sigma_{x4so} / \sigma_{x1sp}) = (27,9 / 116) = 0,241.$$

Ze wzoru (7) oblicza się natomiast czułość przetwornika pomiarowego

$$S_{\sigma x1p} = [(A_p/F).(\sigma_{xavsp}/\sigma_{x1sp}).(U_1 + U_2)/2] = [(260.10^{-6}/20.10^3).(71,6/116).(2166 + 2220)/2],$$

$$S_{\sigma x1p} = 17,6 \text{ mV / MPa}.$$

Wartości naprężenia σ_{x1p} obliczone ze wzoru (6) oraz wartości naprężenia σ_{x1o} na wewnętrznych ścianach i naprężenie σ_{x4o} na zewnętrznych ścianach ogniwa oryginalnego obliczone na podstawie wzorów (4) i (5), czyli

$$\sigma_{x1p} = [(U_1 + U_2) / (2 . S_{\sigma x1p})] = [(U_1 + U_2) / 35,2],$$

$$\sigma_{x1o} = K_{1sp} . \sigma_{x1p} = 0,917 . \sigma_{x1p},$$

$$\sigma_{x4o} = K_{4sp} . \sigma_{x1p} = 0,241 . \sigma_{x1p},$$

podano w tabeli 1.

W analogiczny sposób można wyznaczyć naprężenie σ_x w dowolnym miejscu ogniwa oryginalnego na podstawie pomiarów napięcia U_1 i U_2 za pomocą pomiarowego przetwornika naprężenia.

Podczas wzorcowania przetwornika pomiarowego napięcie U_1 różniło się od napięcia U_2 mniej niż 3% (tabela 1). Jest to spowodowane różnymi przekrojami poprzecznymi poszczególnych połówek ogniwa.

Zależność napięcia U_{1+2} (tabela 1 i rys. 9) jest praktycznie liniową funkcją siły F działającej w osi X ogniwa i wynosi

$$U_{1+2} = S_F . F + U_0,$$

przy czym S_F jest czułością przetwornika siły, a U_0 jest wartością napięcia przy F = 0.

Czułość S_F oraz wartość U_0 wyznaczono metodą najmniejszej sumy kwadratów ze wzoru

$$S_F = \frac{n \sum_{i=1}^{n} F_i U_{(1+2)i} - \sum_{i=1}^{n} F_i \sum_{i=1}^{n} U_{(1+2)i}}{M},$$

$$U_0 = \frac{n \sum_{i=1}^{n} U_{(1+2)i} \sum_{i=1}^{n} F_i^2 - \sum_{i=1}^{n} F_i U_{(1+2)i} \sum_{i=1}^{n} F_i}{M},$$

przy czym

$$M = n \sum_{i=1}^{n} F_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} F_i \right)^2 \qquad i = 1, 2, \ldots, n.$$

Po wstawianiu wartości F_i oraz $U_{(1+2)i}$ z tabeli 1 otrzymano $S_F \approx 220$ mV/kN, $U_o \approx 0$.

4. WNIOSKI

Na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzonych metodą elementów skończonych za pomocą programu PRO-MES 4.4, przedstawionych w artykułach [1], [2], [3] i w tym artykule, oraz na podstawie badań laboratoryjnych opisanych w artykule [4] i w tym artykule stwierdza się, że istnieje możliwość wyznaczania wartości naprężenia w dowolnym miejscu oryginalnego (niesfrezowanego) ogniwa, np. typu F-100, na podstawie pomiarów naprężenia w dwóch miejscach przetwornika pomiarowego, tzn. w miejscach naklejenia tensometrów pomiarowych T_{p1} (napięcie U_1) i T_{p2} (napięcie U_2) na prostych odcinkach wewnętrznie sfrezowanych ścian ogniwa pomiarowego przetwornika naprężenia.

Uwzględniając to, że wymiary ogniw oryginalnych różnią się między sobą o 0,2 mm ÷ 0,6 mm, co stanowi 1% ÷ 4% określonych średnich wymiarów ogniwa, niepewność wyznaczenia wartości naprężenia w wybranym miejscu ogniwa na podstawie pomiarów napięcia U_1 i U_2 nie przekroczy 5%. Natomiast niepewność pomiaru siły zależy od niepewności wzorcowania przetwornika siły i stabilności układu elektronicznego. W opisanym przypadku ta niepewność nie przekracza 2%.

Opracowany i wywzorcowany pomiarowy przetwornik naprężenia i siły będzie stosowany do pomiarów siły w łańcuchu przenośnika. Będzie też stosowany do pomiarów naprężenia na wewnętrznych powierzchniach ogniwa, zwłaszcza podczas przemieszczania się ogniwa po rolkach, na łukach przenośnika.

LITERATURA

1. David D., Parchański J.: Wyznaczanie naprężenia rozciągającego wewnętrznego ogniwa łańcucha pociągowego typu F-100. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 158, Gliwice 1997.
2. David D., Parchański J.: Wyznaczanie naprężenia ścinającego i zredukowanego oraz przemieszczenia określonych punktów wewnętrznego ogniwa łańcucha pociągowego typu F-100. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 158, Gliwice 1997.
3. David D., Parchański J.: Wyznaczanie naprężenia rozciągającego i przemieszczenia dwustronnie sfrezowanego wewnętrznego ogniwa typu F-100. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 158, Gliwice 1997.
4. David D., Parchański J.: Doświadczalna weryfikacja wyników symulacji naprężeń w ogniwie łańcucha typu F-100. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 162, Gliwice 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan Kubisa

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 kwietnia 1998 r.

Abstract

This paper presents the construction and measurement properties of a stress and force transducer developed on the basis of an F-100 chain link, which forms part of the drive system of the conveyor belt at a car factory.

A digital model of the F-100 chain link with its internal walls milled was developed (Figs.1÷4) and the stress occurring at chosen places were determined (Figs.5 and 6).

The internal walls of the chain link were milled and pairs of stress gauges were bonded onto it. Each pair of stress gauges comprised a measurement gauge T_p and a compensation gauge T_k (Fig.7). The stress gauge pairs were powered by direct current (Fig.8). The signal output of the stress gauge pairs were connected via electronic units to digital voltmeters VC. The results of voltage measurements U_1, U_2 and U_{1+2} as well as the results of stress measurements σ_{x1p} and stress simulations σ_{x10}, σ_{x140} are listed in Table 1. Graphs of variations from linearity, ΔU_1, ΔU_2 and ΔU_{1+2} are presented in Fig.9.

The voltage and force transducer developed and tested exhibited good repeatability of results, satisfactory sensitivity and low temperature variance within the 10°C ÷ 30°C range.