

Józef PARCHAŃSKI  
Dwayne DAVID  
Politechnika Śląska

## DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA WYNIKÓW SYMULACJI NAPRĘŻEŃ W OGNIWIE ŁAŃCUCHA TYPU F-100

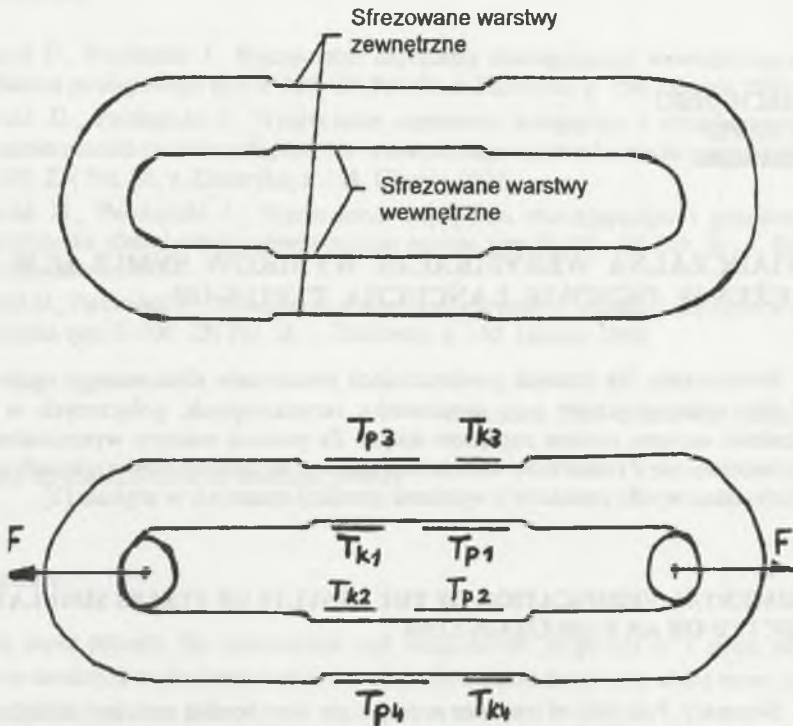
**Streszczenie.** Na czterech powierzchniach dwustronnie sfrezowanego ogniwa typu F-100 naklejono cztery pary tensometrów rezystancyjnych, połączonych w cztery dzielniki napięcia zasilane napięciem stałym. Za pomocą maszyny wytrzymałościowej wytworzono siłę  $F$  i zmierzono wartości naprężenia  $\sigma$  na czterech powierzchniach ogniwa. Porównano wyniki pomiarów z wynikami symulacji opisanych w artykule [3].

### EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE RESULTS OF STRESS SIMULATIONS CONDUCTED ON AN F-100 CHAIN LINK

**Summary.** Four pairs of resistance stress gauges were bonded onto four milled surfaces of an F-100 chain link. The stress gauges were connected up to form four voltage dividers, which were then powered by direct current. A pulling machine was then used to create a force  $F$  and stress values  $\sigma$  on the four surfaces of the chain link were measured. The results of these measurements were compared with those of the simulation described in detail in paper [3].

#### 1. WSTĘP

W artykułach [1], [2] przedstawiono wyniki obliczeń metodą elementów skończonych (za pomocą programu PRO-MES4.4) wartości naprężeń rozciągających  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  w osiach  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  oraz naprężenia zredukowanego wg hipotezy Hubera w cyfrowym modelu oryginalnego ogniwa łańcucha typu F-100. Łańcuch pociagowy przonośnika samochodów jest wykonany z kilku tysięcy ogniw typu F-100. W celu doświadczalnej weryfikacji wyników badań symulacyjnych zaprojektowano i wykonano prototyp przetwornika naprężenia na bazie ogniwa F-100. W tym celu sfrezowano wewnętrzne i zewnętrzne warstwy materiału ogniwa o grubości około 0,65 mm na prostych odcinkach ogniwa wewnętrznego (rys. 1a). Po wyszlifowaniu powierzchni sfrezowanych warstw naklejono na nie tensometry pomiarowe  $T_p$  i kompensacyjne  $T_k$  (rys. 1b).

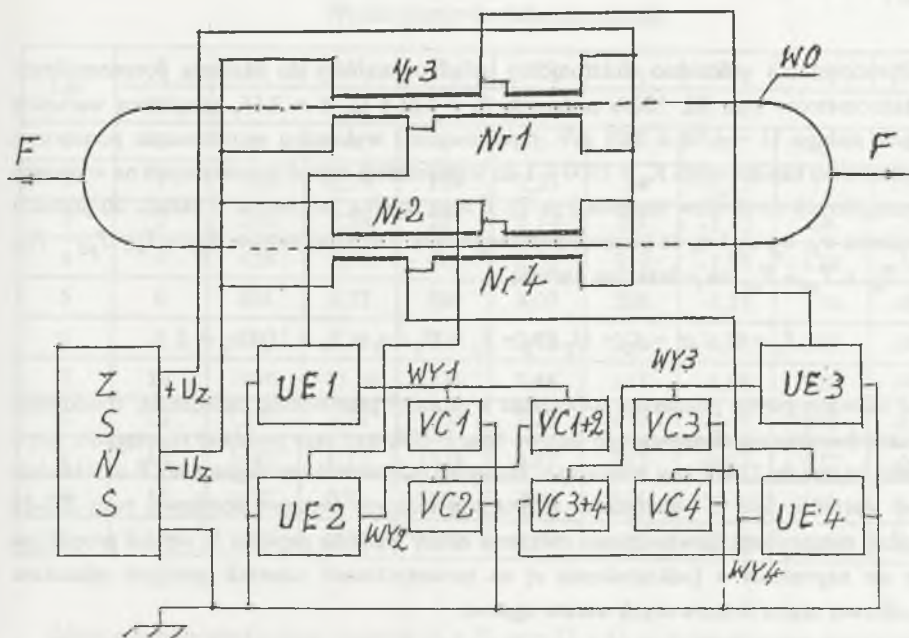


Rys. 1. Szkic prototypu przetwornika naprężenia: a) ogniwo typu F-100 dwustronnie sfrezowane, b) miejsca naklejenia tensometrów  $T_p$  i  $T_k$ .  $F$  — siła działająca na sworznie ogniwa

Fig. 1. A drawing of the stress transducer prototype: a) F-100 chain link milled on two sides, b) the location of the stress gauges  $T_p$  and  $T_k$ .  $F$  — the force acting on the bolt of the chain link

Poszczególne pary tensometrów  $T_p$  i  $T_k$  włączono w oddzielne rezystancyjne dzielniki napięcia i zasilano napięciem stałym. Napięciowe sygnały z dzielników, poprzez układy elektroniczne UE, mierzono woltomierzami cyfrowymi VC (rys.2).

Ponieważ dwustronnie sfrezowane ogniwo F-100, zastosowane w prototypie przetwornika naprężenia, różni się od oryginalnego ogniwa (niefrezowanego), nie można porównywać wyników pomiarów ogniwa dwustronnie sfrezowanego (prototyp przetwornika naprężenia) z wynikami badań symulacyjnych modelu ogniwa oryginalnego, przedstawionymi w artykułach [1], [2].



Rys.2. Idea układu pomiarowego do wyznaczania czułości, liniowości i powtarzalności wyników pomiarów poszczególnych przetworników tensometrycznych nr 1, nr 2, nr 3 i nr 4 oraz do pomiaru naprężenia w poprzecznym przekroju ogniwa typu F-100; WO — wewnętrzne ogniwo F-100, F — siła rozciągająca ogniwo, ZSNS — zasilacz stabilizowany napięcia stałego  $\pm U_z$ , UE1÷UE4 — układy elektroniczne, VC1÷VC4, VC1+2, VC3+4 — woltomierze cyfrowe

Fig.2. The circuit used to determine the sensitivity, linearity and repeatability of the results of the various measurements conducted using the no. 1 - 4 stress gauge transducers as well as to measure the stress in the cross section of the F-100 chain link. WO — the internal chain link, F — longitudinal force applied to the chain link, ZSNS — stabilised direct current supply unit ( $\pm U_z$ ), UE1÷UE4 — electronic units, VC1÷VC4, VC1+2, VC3+4 — digital voltmeters

Aby bezpośrednio porównać wyniki pomiarów laboratoryjnych z wynikami badań symulacyjnych, opracowano model cyfrowy dwustronnie sfrezowanego ogniwa F-100 i metodą elementów skończonych, za pomocą programu PRO-MES4.4 (analogicznie jak w artykułach [1], [2]) obliczono naprężenie rozciągające i przemieszczenia w wybranych miejscach modelu ogniwa zmodyfikowanego. Wyniki badań symulacyjnych wraz z odpowiednimi wykresami przedstawiono w artykule [3].

## 2. POMIARY

Opracowano i wykonano elektroniczny układ pomiarowy do zasilania poszczególnych par tensometrów typu RL 120/6 o danych  $R_t = 121.6 \Omega$ ,  $k = 2.15$ , taką samą wartością napięcia stałego  $U = 4,98 \pm 0,01$  mV. Opracowano i wykonano wzmacniacze pomiarowe o wzmacnieniu napięciowym  $K_u = 1000 \pm 1$  do wzmacniania napięć pomiarowych na wyjściach poszczególnych dzielników napięcia (rys. 2). Z tego wynika, że czułość  $S$  układu do pomiaru naprężenia  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  i  $\sigma_4$  za pomocą poszczególnych par tensometrów  $T_{p1} - T_{k1}, T_{p2} - T_{k2}, T_{p3} - T_{k3}$  i  $T_{p4} - T_{k4}$  ma jednakową wartość

$$S_1 = U_1 / \sigma_1 = S_2 = U_2 / \sigma_2 = S_3 = U_3 / \sigma_3 = S_4 = U_4 / \sigma_4 = S.$$

Przed laboratoryjnymi pomiarami naprężenia wykonany przetwornik naprężenia, zbudowany na bazie dwustronnie sfrezowanego ogniwa typu F-100, trzy razy poddano rozciąganiu siłą o wartości od zera do 22 kN, tzw. trenowaniu. Następnie przetwornik rozciągano siłą  $F$  o dokładnie znanej wartości. Siłę  $F$  wytworzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej typu ZD-10 produkcji niemieckiej. Równocześnie mierzono cztery wartości napięcia  $U$  wprost proporcjonalne do naprężenia  $\sigma$  (odkształcenia  $\epsilon$ ) na powierzchniach czterech prostych odcinków w środkowej części sfrezowanych warstw ogniwa.

Napięcie na wyjściu pomiarowym każdego mostka tensometrycznego jest wprost proporcjonalne do zmiany długości (odkształcenia jednostkowego  $\epsilon$ ) tensometru pomiarowego  $T_p$ . Ponieważ badania były przeprowadzone w zakresie sprężystości materiału (obowiązywania prawa Hooke'a), więc naprężenie

$$\sigma = E \epsilon,$$

przy czym  $E$  jest modułem Younga na rozciąganie materiału. Ogniwa F-100 zostały wykonane ze stali 36HMN, dla której  $E = 206 \cdot 10^9$  Pa.

Wyniki pomiarów napięcia  $U_i$  i wartości bezwzględnych błędów nieliniowości  $\Delta U_i$  obliczone metodą najmniejszej sumy kwadratów podano w tab. 1. Wykresy względnych błędów nieliniowości  $\delta U_i = \Delta U_i / U_{1,2(18)}$  przedstawiono na rys.3a, przy czym  $U_{1,2(18)}$  oznacza średnią wartość napięcia  $U_i$  przy sile  $F = 18$  kN,  $I = 1, 2, 3, 4$ . Wartość naprężenia rozciągającego  $\sigma_x$  istniejącego w poprzecznych przekrojach na prostych odcinkach połówek ogniwa otrzymane z pomiarów przedstawiono na rys.3b, a otrzymane z obliczeń komputerowych przedstawiono na rys.3c.

Przeprowadzone pomiary laboratoryjne wykazały dobrą powtarzalność wyników (odchylenie średniokwadratowe z 5 pomiarów około 0,5% wartości średniej), zadowalającą czułość układu (około 17 mV / MPa) i niezauważalny wpływ zmian temperatury otoczenia na wyniki pomiarów w zakresie od 10°C do 30°C.

Wyniki pomiarów laboratoryjnych

Tabela 1

Lp.	F	U <sub>1</sub>	ΔU <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	ΔU <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	ΔU <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	ΔU <sub>4</sub>
	kN	mV							
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	108	2,29	114	1,35	34	-1,21	32	-1,72
3	2	214	2,59	227	1,70	69	-1,42	64	-3,45
4	4	426	3,18	453	2,39	139	-1,83	129	-5,90
5	6	638	3,77	680	4,09	208	-3,25	194	-8,35
6	8	850	4,36	905	3,78	276	-3,66	260	-9,80
7	10	1046	-11,06	1130	3,48	348	-4,08	328	-9,25
8	12	1270	1,53	1354	2,18	419	-3,49	398	-6,70
9	14	1481	1,12	1578	0,87	492	-0,91	472	-0,15
10	16	1692	0,71	1800	-2,43	566	2,68	546	6,40
11	18	1902	-0,70	2022	-5,74	640	6,26	620	12,95

Różnice między wartościami napięcia  $U_1$  a  $U_2$  oraz  $U_3$  a  $U_4$  są spowodowane nieco różnymi polami powierzchni przekroju poprzecznego prostych dwustronnie sfrezowanych odcinków poszczególnych połówek ogniwa, z którego wykonano prototyp przetwornika napięcia. Stwierdzono, że wymiary ogniw oryginalnych różnią się między sobą o wartość 0,2 – 0,6 mm. Grubość sfrezowanych warstw materiału na obydwu połówkach ogniwa też różniła się o około 0,1 mm. Rozciągająca siła osiowa  $F$  nie działała idealnie w osi ogniwa. To spowodowało, że każda z połówek ogniwa inaczej odkształcała się podczas badań.

W badaniach symulacyjnych za pomocą programu PRO-MES4.4 analizowano model symetryczny (o jednakowych wymiarach), czyli o jednakowych poprzecznych przekrojach każdej z połówek cyfrowego modelu ogniwa. Na podstawie średniej wartości napięcia

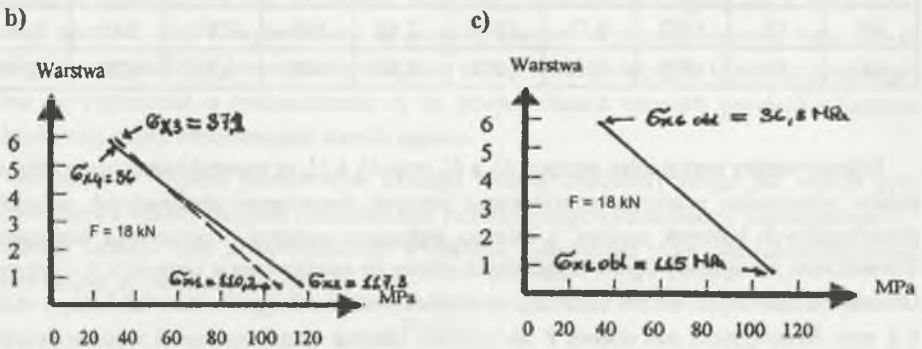
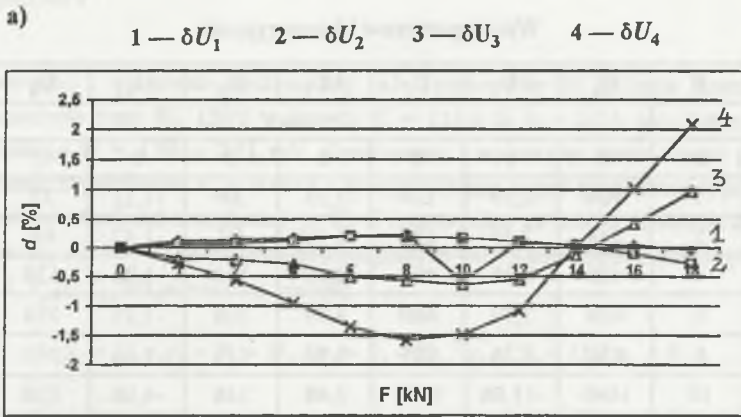
$$U_{\text{śr}} = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4}$$

i średniej wartości naprężenia

$$\sigma_{\text{śr}} = \frac{F}{A},$$

w środkowej części dwustronnie sfrezowanych warstw ogniwa obliczono czułość

$$S = \frac{U_{\text{śr}}}{\sigma_{\text{śr}}}.$$



Rys.3. Wartości względnych błędów nieliniowości  $\delta U_1$ ,  $\delta U_2$ ,  $\delta U_3$ ,  $\delta U_4$  w funkcji siły  $F$  (a). Wartości naprężenia rozciągającego w poprzecznym przekroju ogniwa otrzymane z pomiarów (b) oraz otrzymane z obliczeń symulacyjnych (c)

Fig.3. Values of the relative non-linearity error  $\delta U_1$ ,  $\delta U_2$ ,  $\delta U_3$ ,  $\delta U_4$  as a function of the force  $F$  (a). Values of the longitudinal stress in the cross section of the chain link, obtained from measurements (b) and computer simulations (c)

Zmierzony przekrój poprzeczny A ogniwa typu F-100 dwustronnie sfrezowanego wynosi  $240 \text{ mm}^2$  w środkowej części prostych odcinków ogniwa. Do obliczenia naprężenia

$$\sigma_i = \frac{U_i}{S},$$

gdzie  $i = 1, 2, 3, 4$

na powierzchniach dwustronnie sfrezowanych warstw na prostych odcinkach ogniwa typu F-100, przyjęto średnią czułość zmierzoną przy sile  $F = 6, 12$  i  $18$  kN, czyli

$$S = S_{av} = \frac{1}{3} (17,20 + 17,21 + 17,28) = 17,23 \frac{\text{mV}}{\text{MPa}}$$

Wybrane wartości siły osiowej  $F$ , średnie naprężenie rozciągające  $\sigma_{xav}$ , czułość  $S$  wykonanego przetwornika naprężenia i naprężenie rozciągające  $\sigma_x$  w kierunku osi  $X$  podano w tabeli 2.

Tabela 2

Wybrane wartości siły, czułości i naprężenia

Lp.	F	$\sigma_{av}$	$U_1+U_2+U_3+U_4$	S	$\sigma_{x1}$	$\sigma_{x2}$	$\sigma_{x3}$	$\sigma_{x4}$	$\sigma_{x1}/\sigma_{x3}$	$\sigma_{x2}/\sigma_{x4}$
	kN	MPa	mV	mV/MPa	MPa					
1	6	25,0	1720	17,20	37,0	39,4	12,1	11,3	3,06	3,50
2	12	50,0	3441	17,21	73,0	78,5	24,3	23,1	3,00	3,40
3	18	75,0	5185	17,28	110,2	117,3	37,1	36,0	3,00	3,26

Z tabeli 2 wynika, że stosunek naprężenia  $\sigma_{x1}$  na wewnętrznej powierzchni do naprężenia  $\sigma_{x3}$  na zewnętrznej powierzchni jednej połówki ogniwa dwustronnie sfrezowanego wynosi  $3,0 \div 3,06$ , natomiast w drugiej połóce ogniwa stosunek  $\sigma_{x2}$  na wewnętrznej powierzchni do naprężenia  $\sigma_{x4}$  na zewnętrznej powierzchni wynosi  $3,26 \div 3,50$ . Ta różnica pomiędzy wartościami naprężenia w połówkach ogniwa jest spowodowana różnymi przekrojami poprzecznymi połówek ogniwa. Połówki ogniwa o różnych przekrojach odkształcają się inaczej, a to powoduje różne wartości naprężenia i różne rozkłady naprężenia w poszczególnych przekrojach ogniwa (rys. 3b). Dla porównania wyników pomiarów z wynikami symulacji wartości naprężenia wyznaczone metodą symulacyjną, a opisane w artykule [3], przedstawiono na rys.3c.

### 3. WNIOSKI

Porównanie wyników pomiarów laboratoryjnych (tab. 1 i 2 oraz rys.3b) z wynikami badań symulacyjnych przeprowadzonych za pomocą programu PRO-MES4.4 (rys.3c) wykazuje, iż poprawnie opracowano cyfrowy model ogniwa dwustronnie sfrezowanego, przyjęto poprawne wymiary modelu i poprawnie przeprowadzono badania symulacyjne oraz pomiary laboratoryjne. Z tabeli 1 i 2 oraz rys. 3b wynika, że przy osiowo przyłożonej sile rozciągającej  $F = 18$  kN naprężenia na wewnętrznych powierzchniach ogniwa wynoszą  $\sigma_{x1} = 110,2$  MPa,  $\sigma_{x2} = 117,3$  MPa, a naprężenia na zewnętrznych powierzchniach ogniwa

wynoszą  $\sigma_{x3} = 37,1$  MPa,  $\sigma_{x4} = 36,0$  MPa. Stosunek naprężenia  $\sigma_{x1} / \sigma_{x3} = 2,97$  w jednej połówce ogniwa jest mniejszy niż stosunek  $\sigma_{x2} / \sigma_{x4} = 3,26$  w drugiej połówce ogniwa. Stosunek wartości zmierzonego naprężenia rozciągającego  $\sigma_{x1} + \sigma_{x2}$  na wewnętrznych powierzchniach ogniwa do naprężenia rozciągającego  $\sigma_{x3} + \sigma_{x4}$  na zewnętrznych powierzchniach ogniwa wynosi

$$\frac{\sigma_{x1} + \sigma_{x2}}{\sigma_{x3} + \sigma_{x4}} = \frac{110,2 + 117,3}{37,1 + 36,0} = 3,11$$

i jest prawie równy stosunkowi obliczonego naprężenia  $\sigma_{x1obl.} = 115$  MPa na wewnętrznej powierzchni pierwszej warstwy (wg [3]) do naprężenia  $\sigma_{x6obl.} = 36,8$  MPa na zewnętrznej powierzchni szóstej warstwy wynoszącemu

$$\frac{\sigma_{x1obl.}}{\sigma_{x6obl.}} = \frac{115}{36,8} = 3,13.$$

Wartości naprężenia  $\sigma_{x1obl.}$  wyznaczono na podstawie rys.5a, a naprężenia  $\sigma_{x6obl.}$  — na podstawie rys.9a artykułu [3], czyli wyznaczono je metodą symulacyjną dla siły  $F = 18$  kN. Bezwzględna wartość naprężenia  $\sigma_{x1obl.} = 115$  MPa wyznaczona metodą symulacyjną mieści się w zakresie zmierzonych wartości  $\sigma_{x1} = 110,2$  MPa i  $\sigma_{x2} = 117,3$  MPa. Wartość  $\sigma_{x6obl.} = 36,8$  MPa wyznaczona metodą symulacyjną również mieści się w zakresie  $\sigma_{x3} = 37,1$  MPa i  $\sigma_{x4} = 36,0$  MPa zmierzonych podczas badań prototypu przetwornika naprężenia dwustronnie sfrezowanego.

Tak dobra zgodność badań symulacyjnych z wynikami pomiarów prototypu przetwornika naprężenia zachęca autorów do prowadzenia dalszych prac zmierzających do opracowania pomiarowego przetwornika naprężenia zbudowanego na bazie ogniwa typu F-100 sfrezowanego jednostronnie (tylko wewnętrzne warstwy ogniwa).

## 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.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan Kubisa

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 kwietnia 1998 r.



## Abstract

The aim of this paper is to verify experimentally the results of stress simulations conducted on an F-100 chain link, which forms part of a conveyor drive system. To do so, an F-100 internal chain link was milled on its inner and outer surfaces (Fig. 1a), after which stress measuring and compensation gauges  $T_p$  and  $T_k$  were bonded to these surfaces, respectively. The various pairs of stress gauges were powered by direct current of corresponding voltage  $\pm U_z$ . The output signal from the stress gauge pairs was measured using digital voltmeters VC after being processed by electronic units UE (Fig. 2). The results of these voltage measurements,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  and  $U_4$ , proportional to the tensile stress  $\sigma_{x1}$ ,  $\sigma_{x2}$ ,  $\sigma_{x3}$  and  $\sigma_{x4}$  occurring on the milled surfaces of the chain link, are listed in Table 1 and displayed in Fig. 3b. The measured tensile stress values ( $\sigma_{x1} \div \sigma_{x4}$ ) are listed in Table 2, while the deviation from linearity is displayed in Fig. 3a. Fig. 3c shows the stress values determined during earlier simulations conducted using the PRO-MES4.4 software and described in paper [3].

The results of the laboratory tensile stress measurements  $\sigma_{x1} \div \sigma_{x4}$  are compliant with those obtained during earlier stress simulations.