

Alfred CARBOGNO

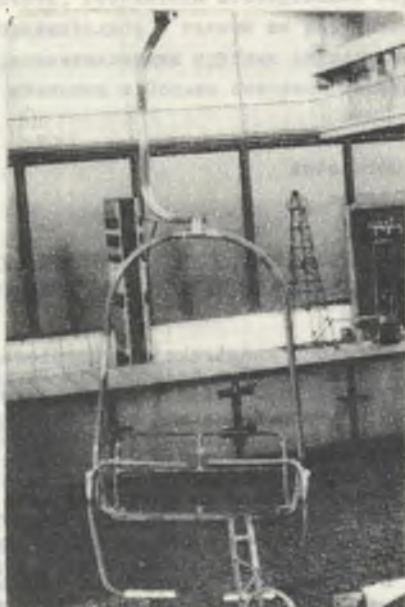
Instytut Mechanizacji Górnictwa
Politechnika Śląska, Gliwice

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE DWUOSOBOWYCH KRZESZEK KOLEJKI LINOWEJ "ELKA"

Streszczenie. Omówiono konstrukcję dwuosobowego krzesełka kolejki linowej "Elka" wybudowanej w Wojewódzkim Parku Kultury i Wypoczynku w Katowicach (WPKiW). Przedstawiono sposób i wyniki obliczeń wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych konstrukcji krzesełka. Podano metodę oraz wyniki badań wytrzymałościowych na zmęczenie serii sześciu krzesełek po okresie ich 10-letniej eksploatacji w niekorzystnej, z uwagi na działanie korozji, atmosferze przemysłowej Górnego Śląska. Badania te przeprowadzono w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej (IMG Pol. Śl.). Zaprezentowano również wyniki badań współczynników dynamicznych Ψ , jakie występują w konstrukcji krzesełka podczas jego eksploatacji na kolei. W związku z otrzymanymi negatywnymi wynikami badań zmęczeniowych krzesełek, na które wpływ miała występująca korozja rur konstrukcji krzesełek, szczególnie w miejscach spoin, przedstawiono działania doraźne w celu dopuszczenia krzesełek do dalszej okresowej eksploatacji do czasu wymiany ich na nowe. Działania te obejmowały szczegółową kontrolę wizualną oraz za pomocą penetrantu niebezpiecznych przekrojów wszystkich eksploatowanych około 700 sztuk krzesełek. Konstrukcja ram krzesełek została dodatkowo wzmożona i poddana badaniom zmęczeniowym. Wynikające z badań wnioski zostały wykorzystane przez projektantów przy konstruowaniu nowych krzesełek.

1. WSTĘP

Osobowa kolejka linowa "Elka" znajdująca się na terenie WPKiW w Katowicach została uruchomiona w 1968 r. Od tego czasu są w eksploatacji na trzech odcinkach kolejki dwuosobowe krzesełka (rys. 1) zaprojektowane przez Pracownię "Translin" KBPBP w Zakopanem. W związku z upływem 10 lat eksploatacji tej kolejki Inspektorat Kolejowy Okręgowego Dozoru Technicznego w Krakowie zalecił przeprowadzenie badań eksploatacyjnych i wytrzymałościowych krzesełek w celu określenia ich dalszej przydatności. Zalecenie takie było jak najbardziej celowe, ponieważ kolejka "Elka" eksploatowana jest w bardzo niekorzystnej atmosferze przemysłowej Górnego Śląska, sprzyjającej korozji konstrukcji stalowych, w przeciwieństwie do atmosfery, w jakiej eksploatowane są pasażerskie kolejki górskie. Zachodziła poważna obawa o do uszkodzenia konstrukcji krzesełek, a tym samym niebezpieczeństwa ich dalszej eksploatacji. Opracowany program badań w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej obejmował przeprowadzenie badań wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych wybranej



Rys. 1. Widok dwuosobowego krzeselka kolejki linowej "Elka" w WPKiW w Katowicach

Fig. 1. View of a chair for two persons of ropeway "Elka" in WPKiW in Katowice

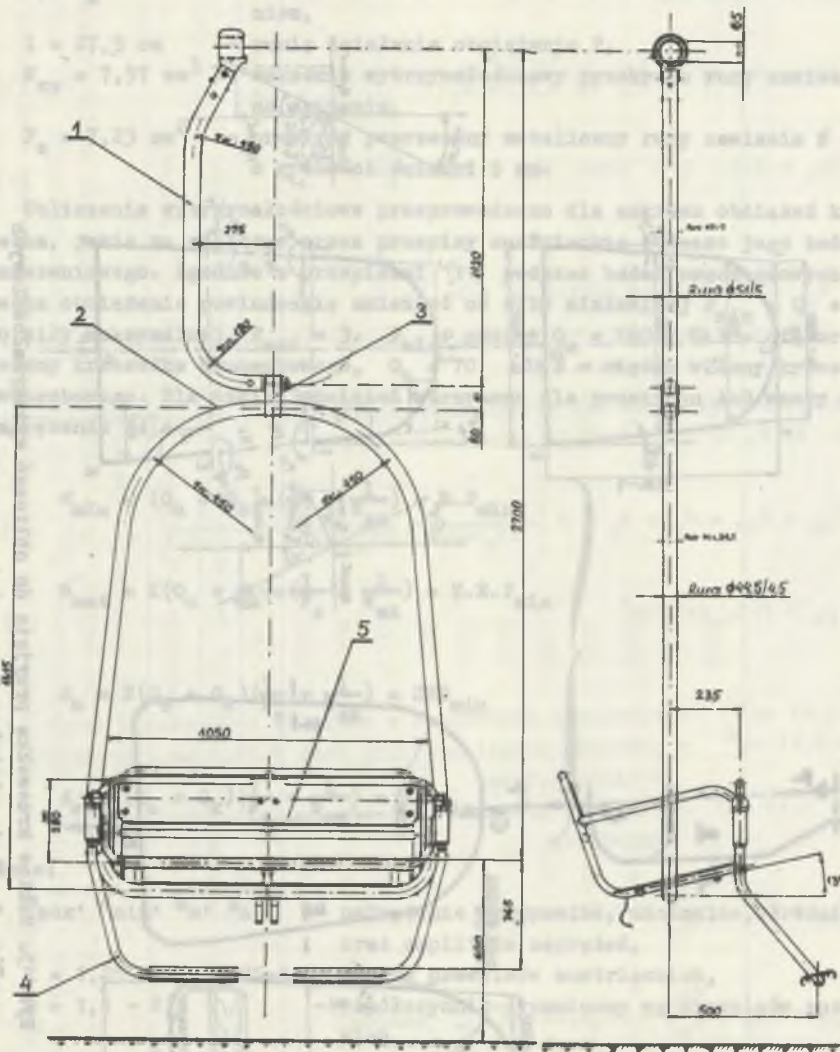
losowo partii krzeszełek na stanowisku badawczym oraz przeprowadzenie badań eksploatacyjnych obejmujących pomiary obciążeń krzeszełek podczas ich ruchu, kontrolę wizualną krzeszełek oraz badanie nieniszczące za pomocą penetrantu.

2. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA KRZESZELEK

Konstrukcja krzeselka (rys. 2) składa się z zamkniętej ramy i zawiesia (w postaci odpowiednio wygiętej rury) połączonego z ramą za pomocą łącznika. Rury wykonane są z materiału R 45. Przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe dla najbardziej wyciężonych przekrojów (zaznaczonych na rys. 3a) zarówno dla zawiesia, jak i ramy.

Dla zawiesia (przekrój A-B) naprężenia sumaryczne wynoszą [8]:

$$\sigma_z = \sigma_r + \sigma_g = P \left(\frac{1}{F_z} + \frac{1}{W_{zx}} \right), \quad (1)$$

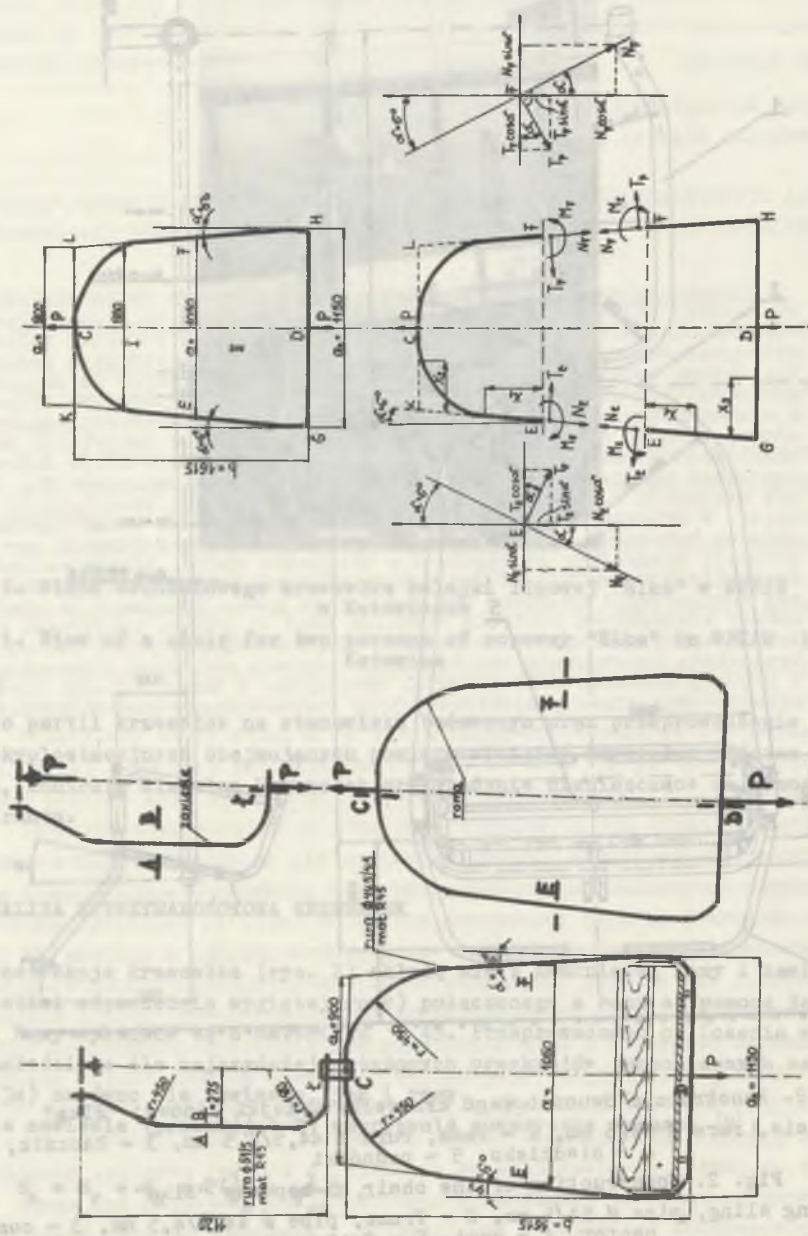


Rys. 2. Konstrukcja dwuosobowego krzeselka kolejki linowej "Elka"

- 1 - zawieszanie, rura \varnothing 51/5 mm, 2 - rama, rura \varnothing 44,5/4,5 mm, 3 - łącznik,
4 - siedzisko, 5 - podnóżki

Fig. 2. Construction of the chair of ropeway "Elka"

- 1 - lifting sling, pipe \varnothing 51/5 mm, 2 - frame, pipe \varnothing 44,5/4,5 mm, 3 - con-
nector, 4 - seat, 5 - foot-rest



Rys. 3. Szkice krzeszka przyjęte do obliczeń wytrzymałościowych
 Fig. 3. Chair sketches for resistance calculations

gdzie:

- σ_r, σ_g - naprężenia normalne wywołane rozciąganiem i zginaniem,
 $l = 27,5 \text{ cm}$ - ramię działania obciążenia P ,
 $W_{xz} = 7,57 \text{ cm}^3$ - wskaźnik wytrzymałościowy przekroju rury zawiesia na zginania,
 $F_z = 7,23 \text{ cm}^2$ - przekrój poprzeczny metalicznej rury zawiesia $\phi 51 \text{ mm}$ o grubości ścianki 5 mm .

Obliczenia wytrzymałościowe przeprowadzono dla zakresu obciążeń krzeszka, jakie są zalecane przez przepisy austriackie podczas jego badania zmęczeniowego. Zgodnie z przepisami [11] podczas badań zmęczeniowych krzeszka obciążenie powinno się zmieniać od siły minimalnej $P_{\min} = Q_u + Q_k$ do siły maksymalnej $P_{\max} = 3 \cdot P_{\min}$, gdzie: $Q_u = 160 \text{ daN}$ - ciężar użyteczny krzeszka dwuosobowego, $Q_k = 70 \text{ daN}$ - ciężar własny krzeszka dwuosobowego. Dla takich obciążeń otrzymano dla przekroju A-B wzory na naprężenia [4]:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{\min} &= (Q_u + Q_k) \cdot \left(\frac{1}{F_z} + \frac{l}{W_{xz}} \right) = R \cdot P_{\min} \\
 \sigma_{\max} &= K(Q_u + Q_k) \cdot \left(\frac{1}{F_z} + \frac{l}{W_{xz}} \right) = K \cdot R \cdot P_{\min} \\
 \sigma_m &= 2(Q_u + Q_k) \cdot \left(\frac{1}{F_z} + \frac{l}{W_{xz}} \right) = 2R P_{\min} \\
 \sigma_a &= (Q_u + Q_k) \cdot \left(\frac{1}{F_z} + \frac{l}{W_{xz}} \right) = R \cdot P_{\min}
 \end{aligned} \right\} (2)$$

gdzie:

- $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_m, \sigma_a$ - naprężenie maksymalne, minimalne, średnie oraz amplituda naprężeń,
 $K = 1,25 \cdot \psi = 1,25-3$ - według przepisów austriackich,
 $\psi = 1,1 - 2,4$ - współczynnik dynamiczny wg przepisów austriackich,
 $R = 3,8 \text{ cm}^2$ - wyrażenie pomocnicze po uwzględnieniu parametrów zawiesia.

Obliczenia wytrzymałościowe ramy przeprowadzono według zasad obliczeń ram podanych w pracy [8]. Dla szkicu ramy z zaznaczonymi siłami przedstawionego na rys. 3b ułożono układ ośmiu równań, który rozwiązano w pracy [4]. Do obliczeń przyjęto założenie upraszczające polegające na pominięciu w obliczeniach bardzo małego kąta $\alpha = 6^\circ$ ($\cos \alpha = 0,994 \approx 1$,

$\sin \alpha = 0,1 \approx 0$), traktując ramę jako prostokątne. Ostatecznie otrzymano wzory na obliczenie momentów zginających w poszczególnych przekrojach C, D, E, F ramy [4]:

$$M_{GF} = M_{EF} = P \left[\frac{1}{8} \cdot \frac{a_1^2 + a_2^2}{2b + a_1 + a_2} \right] = P \cdot S, \quad (3)$$

$$M_{GC} = P(S - \frac{a_1}{4}) \quad \text{oraz} \quad M_{GD} = P(S - \frac{a_2}{4}) \quad (4)$$

gdzie:

a_1, a_2, b - według szkicu na rys. 3b

$S = 5,05$ cm - wyrażenie pomocnicze we wzorze (3) otrzymane po wstawieniu danych.

Naprężenie sumaryczne (od rozciągania i zginania) w analizowanych przekrojach E, F, C, d określają zależności [4]:

$$\sigma_{RE} = \sigma_{RF} = \sigma_r + \sigma_g = P \left[\frac{1}{2F_r \cos \alpha} + \frac{a_1^2 + a_2^2}{8W_{Rx}(2b + a_1 + a_2)} \right], \quad (5)$$

$$R_E = P \cdot Z, \text{ daN/cm}^3 \quad (6)$$

gdzie:

$Z = 1,07 \text{ cm}^{-2}$ - wyrażenie pomocnicze w nawiasie kwadratowym (wzór 5),

$F_r = 5,61 \text{ cm}^2$ - przekrój metaliczny rury ramy $\varnothing 44,5$ mm o grubości ścianki 4,5 mm,

$W_{Rx} = 5,14 \text{ cm}^3$ - wskaźnik wytrzymałości przekroju rurowej ramy na zginanie,

$$\sigma_{RC} = \sigma_{GC} = \frac{M_{GC}}{W_{Rx}} = P \cdot (3,4 \text{ cm}^{-2}), \text{ daN/cm}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{RD} = \sigma_{GD} = \frac{M_{GD}}{W_{Rx}} = P \cdot (4,66 \text{ cm}^{-2}), \text{ daN/cm}^2 \quad (8)$$

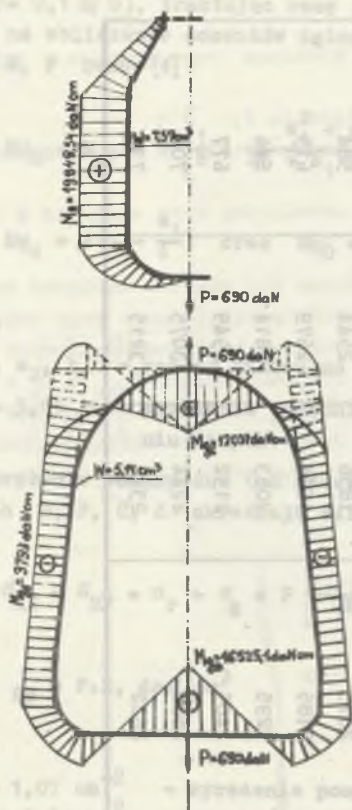
Wyniki obliczeń naprężeń statycznych w konstrukcji krzeselka dla różnych przypadków obciążenia P krzeselka przedstawiono w tabelicy 1, a przebieg momentów zginających M_g dla maksymalnego obciążenia krzeselka siłą 690 daN przedstawiono na rys. 4.

Z przeprowadzonych obliczeń teoretycznych wynika, że udział naprężeń rozciągających w naprężeniach sumarycznych, jakie występują w zawieszaniu i ramie krzeselka, jest bardzo mały. W zawieszaniu wynoszą one 3,6% a w ramie

Tablica 1

Obliczone teoretycznie wartości naprężeń statycznych σ daN/cm² w analizowanych przekrojach konstrukcji dwuosobowego krzesełka KL "Elka". Dla obciążenia minimalnego $P_{\min} = 230$ daN naprężenia minimalne σ_{\min} wynoszą w przekroju B - 874, C - 782, D - 1072, E, F - 246 daN/cm². * - naprężenia obliczone bez uwzględnienia usztywnienia ramy siedziskiem krzesełka

Współczynnik dynamiczny ϕ	K = 1,25 $\cdot \phi$	Obciążenie maksymalne P_{\max} daN	Naprężenie statyczne maksymalne σ_{\max} daN/cm ²			
			Przekrój zawieszający		Przekroje ramy	
			B	C	D*	E, F
1,4	1,75	403	1591	1370	1877	431
1,5	1,875	431	1698	1485	2008	461
1,6	2,0	460	1748	1564	2193	492
1,7	2,125	480	1858	1663	2278	523
1,8	2,25	518	1969	1761	2413	554
1,9	2,375	546	2075	1856	2544	584
2,0	2,5	575	2185	1955	2679	615
2,1	2,625	604	2295	2053	2814	646
2,2	2,75	633	2405	2152	2949	677
2,3	2,87	660	2508	2244	3075	706
2,4	3,0	690	2622	2346	3215	738



Rys. 4. Wykres momentów zginających M_g występujących w konstrukcji krzesła przy obciążeniu $P = 690$ daN

Fig. 4. Diagram of bending moment M_g occurring in the chair structure with load $P = 690$ daN

8,1% naprężeń sumarycznych w rozpatrywanych przekrojach. Z powyższego widać, że decydujący wpływ na wytrzymałość konstrukcji krzesła mają naprężenia zginające. Statyczne naprężenia nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych na zginanie $kg = 1700$ daN/cm² dla materiału rur R 45:

- w przekroju A-B zawiesia przy obciążeniu do $P_{\max} = 460$ daN, czyli przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego, $\psi = 1,6$,
- w przekroju C ramy $P_{\max} = 518$ daN, $\psi = 1,8$,
- w przekroju D ramy przyjęto tak samo jak w przekroju C,
- w przekroju E, F ramy dla wszystkich przypadków podanych w tabelicy 1 naprężenia sumaryczne nie przekraczają wartości naprężeń dopuszczalnych kg .

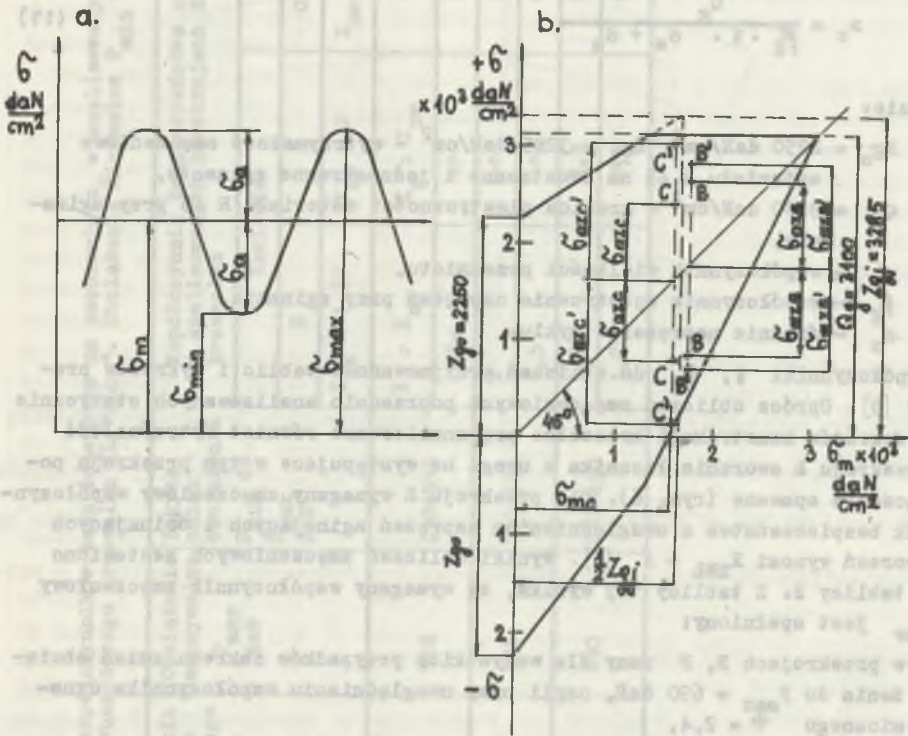
Należy zaznaczyć, że z uwagi na usztywnienie dolnej części ramy siedziskiem krzesła faktyczne naprężenia w przekroju D są znacznie mniejsze od naprężeń podanych w tabelicy 1. W przypadku przyjęcia dla materiału R 45 naprężeń dopuszczalnych $kg = 2100$ daN/cm² co podają niektóre podrozdzinki i norma PN-73/H-74219, można stwierdzić, że obliczone statyczne naprężenia w konstrukcji krzesła nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych kg (przekrój D ramy pominięto z uwagi na usztywnienie siedziskiem) przy obciążeniu krzesła

do $P_{\max} = 575$ daN, czyli przy $\psi = 2$. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że pod względem wytrzymałości statycznej krzesło jest odpowiednio wytrzymałe. Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej przeprowadzono jako sprawdzające dla kształtu i wymiarów konstrukcji krzesła zawartych w dokumentacji technicznej kolei. Obliczenia te sprawdzają się do ustalenia zmęczeniowego współczynnika bezpieczeństwa x_z i sprawdzenia, czy współczynnik ten jest mniejszy od wymaganego współczynnika bezpieczeństwa na zmęczenie x_{zw} , który określono z zależności [9]:

$$x_{zw} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 = 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,59 \quad (9)$$

gdzie:

- X_1 - współczynnik pewności założeń (przyjęto $X_1 = 1,1$, ponieważ materiał jest atestowany),
- X_2 - współczynnik ważności przedmiotu (przyjęto $X_2 = 1,2$, ze względu na możliwość spowodowania wypadku),
- X_3 - współczynnik jednorodności materiału (przyjęto $X_3 = 1,1$, ponieważ rura jest ciągniona),
- X_4 - współczynnik zachowania wymiarów (przyjęto $X_4 = 1,1$, ponieważ rura jest ciągniona).



Rys. 5. Wykres:

a - cyklu niesymetrycznego o stałym naprężeniu średnim $\sigma_m = \text{const}$ przyjętego do obliczeń zmęzeniowych, b - Smithe'a dla materiału R 45. Punkty B, C oznaczają zakresu zmian naprężeń według tablicy 1, C' - to samo z uwzględnieniem działania spoiny (koncentracji naprężeń) w punkcie C ramy dla przypadku zmiany sił od $P_{\min} = 230 \text{ daN}$ do $P_{\max} = 690 \text{ daN}$

Fig. 5. Diagram

a - of non-symmetric cycle with constant average stress $\sigma_m = \text{const}$. taken for fatigue calculations, b - Smithe'a for material R 45. Points B, C determining the range of stress changes according to tab. 1, C' - The same but considering weld acting (stress concentration) at point C of the frame for the case of force change from $P_{\min} = 230 \text{ daN}$ to $P_{\max} = 690 \text{ daN}$

Obliczenia zmęczeniowe przeprowadzono dla granic zmian obciążenia krzesła od P_{\min} do $P_{\max} = 3 \cdot P_{\min}$ zgodnie z wymogami przepisów [11]. Dla przebiegu obciążeń zmiennych przyjętych do rozważań (rys. 5a) przy $\sigma_m = \text{const}$, zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa x_z jest równy mniejszej z dwóch wartości otrzymanych ze wzorów [9]:

$$x_z = \frac{Z_{G_0} + 2\sigma_m \left(1 - \frac{Z_{G_0}}{Z_{G_1}}\right)}{\beta_g \cdot \gamma \cdot \sigma_a + \sigma_m}, \quad (10)$$

$$x_z = \frac{Q_g}{\beta_g \cdot \gamma \cdot \sigma_a + \sigma_m} \quad (11)$$

gdzie:

- $Z_{G_0} = 2250 \text{ daN/cm}^2$, $Z_{G_1} = 3285 \text{ daN/cm}^2$ - wytrzymałość zmęczeniowa materiału R 45 na dwustronne i jednostronne zginanie,
 $Q_g = 3100 \text{ daN/cm}^2$ - granica plastyczności materiału R 45 przy zginaniu,
 γ - współczynnik wielkości przedmiotu,
 β_g - współczynnik spiętrzenia naprężeń przy zginaniu,
 σ_m - średnie naprężenie cyklu,

Współczynniki γ , β_g do obliczeń przyjmowano z tablic i wykresów pracy [9]. Oprócz obliczeń zmęczeniowych poprzednio analizowanych statycznie przekrojów konstrukcji krzesła przeanalizowano również wytrzymałość przekroju Ł sworznia łącznika z uwagi na występujące w tym przekroju połączenie spawane (rys. 6). Dla przekroju Ł wymagany zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa z uwzględnieniem naprężeń zginających i ścinających sworzeń wynosi $x_{ZWL} = 2$ [4]. Wyniki obliczeń zmęczeniowych zestawiono w tabelicy 2. Z tabelicy tej wynika, że wymagany współczynnik zmęczeniowy x_{zw} jest spełniony:

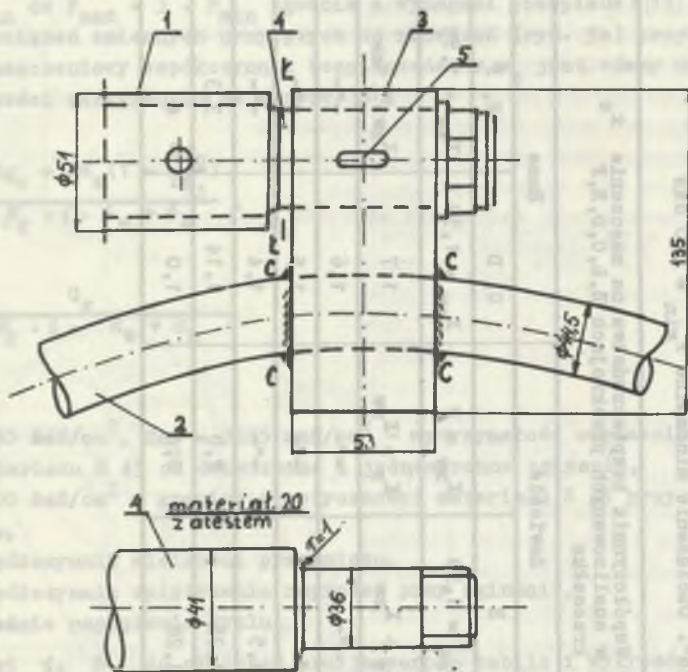
- w przekrojach E, F ramy dla wszystkich przypadków zakresu zmian obciążenia do $P_{\max} = 690 \text{ daN}$, czyli przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 2,4$,
- w przekrojach C i D ramy przy uwzględnieniu współczynnika $\psi = 1,8$,
- w przekroju A zawiesia przy $\psi = 1,9$,
- w przekroju Ł zawiesia przy $\psi = 2,4$.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najniebezpieczniejszym przekrojem w konstrukcji krzesła pod względem zmęczeniowym jest przekrój C ramy. Przeprowadzenie badań zmęczeniowych krzesłaek na stanowisku laboratoryjnym przy zmianie obciążenia od P_{\min} do $P_{\max} = 3 \cdot P_{\min}$, czyli przy $\psi = 2,4$, może spowodować pęknięcie konstrukcji krzesłaek właśnie w przekroju C, pomijając wpływ na wytrzymałość korozji i ewentualnych wad materiałowych

Tablica 2

Wybrane wyniki obliczeń współczynników bezpieczeństwa na zmęczenie X w analizowanych przekrojach konstrukcji dmuesobowego krzesła KL "Elka". Obciążenie minimalne $P_{min} = 230$ daN

ψ	Współczynnik obciążenia maksymalnego $K = 1,25\psi$	Obciążenie maksymalne P_{max} daN	Zakres zmian obciążenia P_{min} do P_{max} daN	Współczynnik bezpieczeństwa na zmęczenie X_Z w analizowanych przekrojach B, L, C, D, E, F, P krzesła					
				Zawiesie				Rama	
				B	L	C, D	E, F		
1,8	2,25	518	230-518	$X_{ZW} = 1,59$	$X_{ZW} = 2$	$X_{ZW} = 1,59$	$X_{ZW} = 1,59$	$X_{ZW} > X_{ZW}$	
1,9	2,375	546	230-546	-"-	$X_Z > X_{ZW}$	1,7	1,6	-"-	
2,4	3,0	690	230-690	2	-"-	1,5	1,5	-"-	
				1,5	-"-	1,4	1,4	-"-	
				1,35	2,8	1,14	1,14	3,3	
				1,28	2,4	1,0	1,0	4	



Rys. 6. Szkic połączenia zawiesia z ramą konstrukcji krzeselka za pomocą łącznika

1 - rura zawiesia, 2 - rura ramy, 3 - łącznik, 4 - sworzeń, 5 - zawleczka, 6 - nakrętka

Fig. 6. Sketch of lifting sling connection to chair construction frame by means of connector

1 - lifting sling pipe, 2 - frame pipe, 3 - connector, 4 - bolt, 5 - cotter pin, 6 - nut

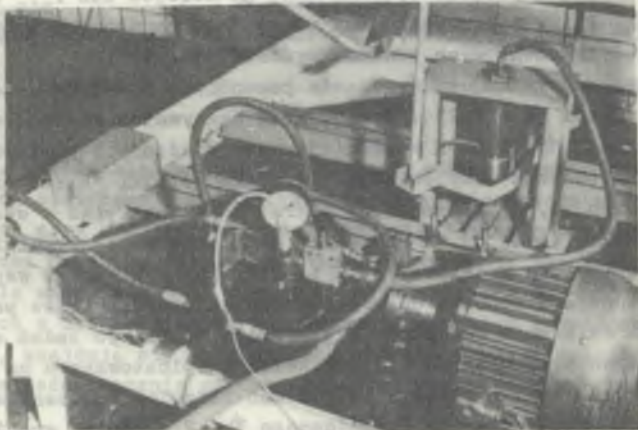
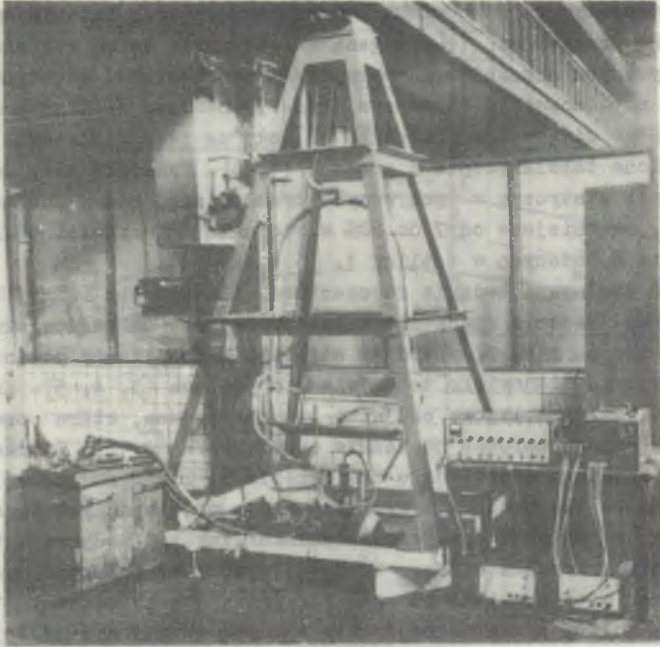
konstrukcji. Obliczenia zmęczeniowe wykazały więc, że mimo odpowiedniej wytrzymałości statycznej, krzeselka mogą ulec zniszczeniu podczas badań zmęczeniowych przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\phi = 2,4$ zalecanego przez przepisy [11]. Naniesione na wykresie zmęczeniowym Smitha (rys. 5b) dla materiału R 45 punkty C', odpowiadające zakresowi naprężeń zmęczeniowych z uwzględnieniem koncentracji naprężeń spowodowanych istnieniem spoiny, znajdują się na granicach obszaru wykresu zmęczeniowego, co nie zapewnia jednoznacznie zadowalającej wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji.

3. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE KRZESEŁEK

Badania obejmowały pomiary naprężeń statycznych, jakie występują w konstrukcji krzeselka na stanowisku laboratoryjnym oraz badania zmęczeniowe na określonej przepisami [11] wymaganą liczbę cykli zmian obciążeń. Podczas badań statycznych krzeselko z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi zawieszono na stanowisku badawczym (rys. 7) poddano działaniu siłownika hydraulicznego ciągnącego krzeselko od dołu za jego siedzisko. Wyniki badań zestawiono tabelarycznie w pracach [4, 6]. Wykazały one, że pomierzone naprężenia statyczne w tych samych przekrojach, które analizowano teoretycznie, są mniejsze od 7 do 20% w stosunku do wartości obliczonych teoretycznie a podanych w tabelicy 1.

Na uwagę zasługują badania zmęczeniowe, dlatego ten rodzaj badań omówiono szerzej. Badania zmęczeniowe przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 7, z tym że siłownik hydrauliczny połączono z układem pulsacyjnym. Stanowisko to omówiono w pracach [3, 4, 5]. Krzeselka również posiadały naklejone czujniki tensometryczne, które pozwalały na rejestrację zmian naprężeń na taśmie oscylografu [4, 6]. Zawieszenie krzeselka na stanowisku odpowiadało zawieszeniu na linie za pomocą wprzędza, krzeselko mogło się swobodnie wychylać w dwu prostokątach do siebie płaszczyszczach, z tym że punkt podparcia odcinka liny był podporą sztywną. Zmianę obciążenia krzeselka od P_{\min} do P_{\max} wywoływał pulsator hydrauliczny, którego widok przedstawiono na rys. 7b. Zgodnie z przepisami [11] badania zmęczeniowe należy przeprowadzać przy zmianie obciążenia od $P_{\min} = Q_u + Q_k$ do $P_{\max} = 3 P_{\min}$, w przypadku gdy nie znane są współczynniki dynamiczne ψ obciążeń krzeselka podczas eksploatacji na kolejce lub P_{\min} do $P_{\max} = 1,25 \cdot \psi \cdot P_{\min}$, w przypadku gdy znany jest współczynnik dynamiczny ψ . Liczba cykli zmęczeniowych powinna wynosić $5 \cdot 10^6$.

Z powyższego wynika, że wyrażenie pomocnicze K według przepisów austriackich wynosi $K = 1,25 \cdot \psi = 3$, skąd maksymalna wartość współczynnika dynamicznego $\psi = 2,4$. Z wcześniej przeprowadzonych pomiarów naprężeń dynamicznych podczas eksploatacji krzeselka kolejki "Elka" przedstawionych w pracach [1, 2] sporządzono wykres zmian naprężeń w czasie cyklu pracy krzeselka (rys. 8), a następnie obliczono współczynniki dynamiczne, które przedstawiono w tabelicy 3. Z tabelicy tej wynika, że współczynnik ψ osiąga wartość 2,6 podczas celowego wymuszania drgań przez pasażerów, a 1,9 podczas wsiadania dwu osób. W pierwszym etapie do badań zmęczeniowych wybrano losowo trzy spośród 677 krzeseltek eksploatowanych na trzech odcinkach kolejki "Elka". Krzeselka te poddano badaniom zmęczeniowym przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 2,4$, dolna granica obciążenia $P_{\min} = 160$ daN plus ciężar własny, a górna granica $P_{\max} = 3 P_{\min}$, czyli 690 daN (nastawy pulsatora 160 daN do 620 daN). Pierwsze krzeselko o numerze 568 uległo uszkodzeniu po 200 000 cykli (rys. 9a i 10a). Na rys. 10 widoczne są wyraźnie pęknięcia przekroju rury spowodowane niewłaściwym



Rys. 7. Widok

a - krzeszka na stanowisku badawczym, b - napędu pulsatora

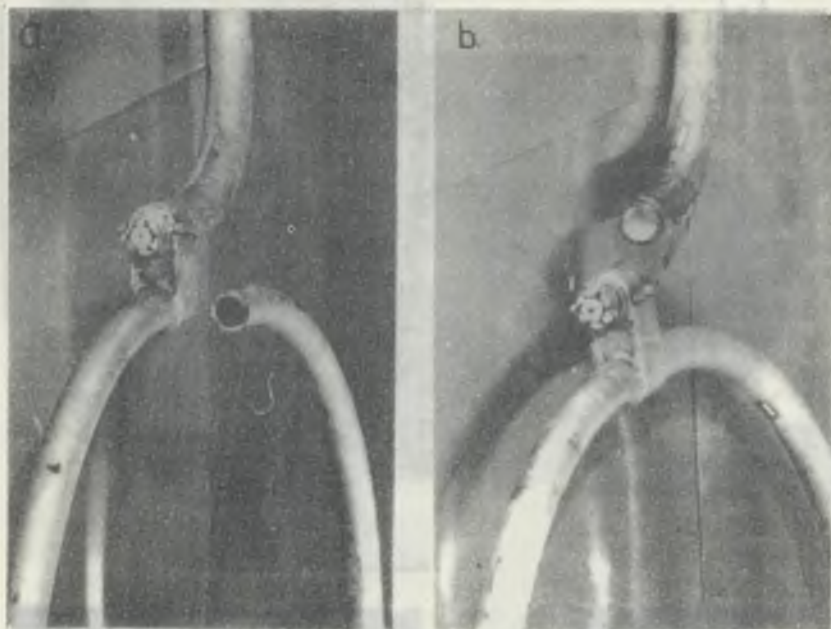
Fig. 7. View

a - of chairs at investigation stand, b - of pulsator drive

Tablica 3

Pomierzone wartości współczynników obciążeń dynamicznych ψ występujących w konstrukcji krzesełka dwuosobowego kolejki linowej "Elka" podczas jego eksploatacji

Miejsce pomiaru na trasie	Punkt pomiarowy na krzesełku	Rodzaj podpory	Współczynnik dynamiczny ψ						
			punkt pomiarowy na krzesełku rys. 8					ψ średnio	
			1	2	3	4	5		
I - rozruch kolejki		-	0,161	0,05	0,185	0,3	0,065	0,185	0,157
II - przejazd przez podporę bramową gniotaca		00	0,183	0,238	0,239	0,416	0,431	0,314	0,30
III - przejazd przez krążek wsporczy kierunkowy		01	0,248	0,224	0,287	0,268	0,304	0,214	0,257
IV - przejazd przez koło napędowe		05	0,417	0,388	0,384	0,296	0,362	-	0,369
V - przejazd przez krążek wsporczy kierunkowy		01	0,247	0,268	0,334	0,296	0,33	0,314	0,298
VI - przejazd przez podporę bramową gniotaca		00	0,413	0,06	0,575	0,622	0,102	0,426	0,366
VII - wsiadanie na krzesełko 2 osób $Q_u = 170 \text{ daN}$			1,91	1,90	1,94	1,74	1,91	-	1,88
VIII - podpora bramowa		00	1,15	1,22	1,25	1,28	1,29	1,47	1,28
IX - przejazd spokojny pomiędzy podporami		-	1,17	1,10	1,20	1,16	1,13	1,14	1,15
X - podpora słupowa		00	1,17	1,10	1,26	1,19	1,16	1,27	1,19
XI - podpora słupowa		0000	1,01	1,07	1,16	1,22	1,11	1,57	1,19
XII - podpora słupowa		0000	1,07	1,13	1,16	1,13	1,09	1,27	1,14
XIII - wymuszanie drgań na krzesełku przez 2 osoby			2,3	2,6	2,5	2,6	2,5	-	2,5
XIV - podpora słupowa z wymuszeniem drgań		0000	2,3	2,08	2,6	2,6	1,8	-	2,27
XV - hamowanie awaryjne kolejki			1,5	1,22	1,64	1,98	1,21	1,47	1,5



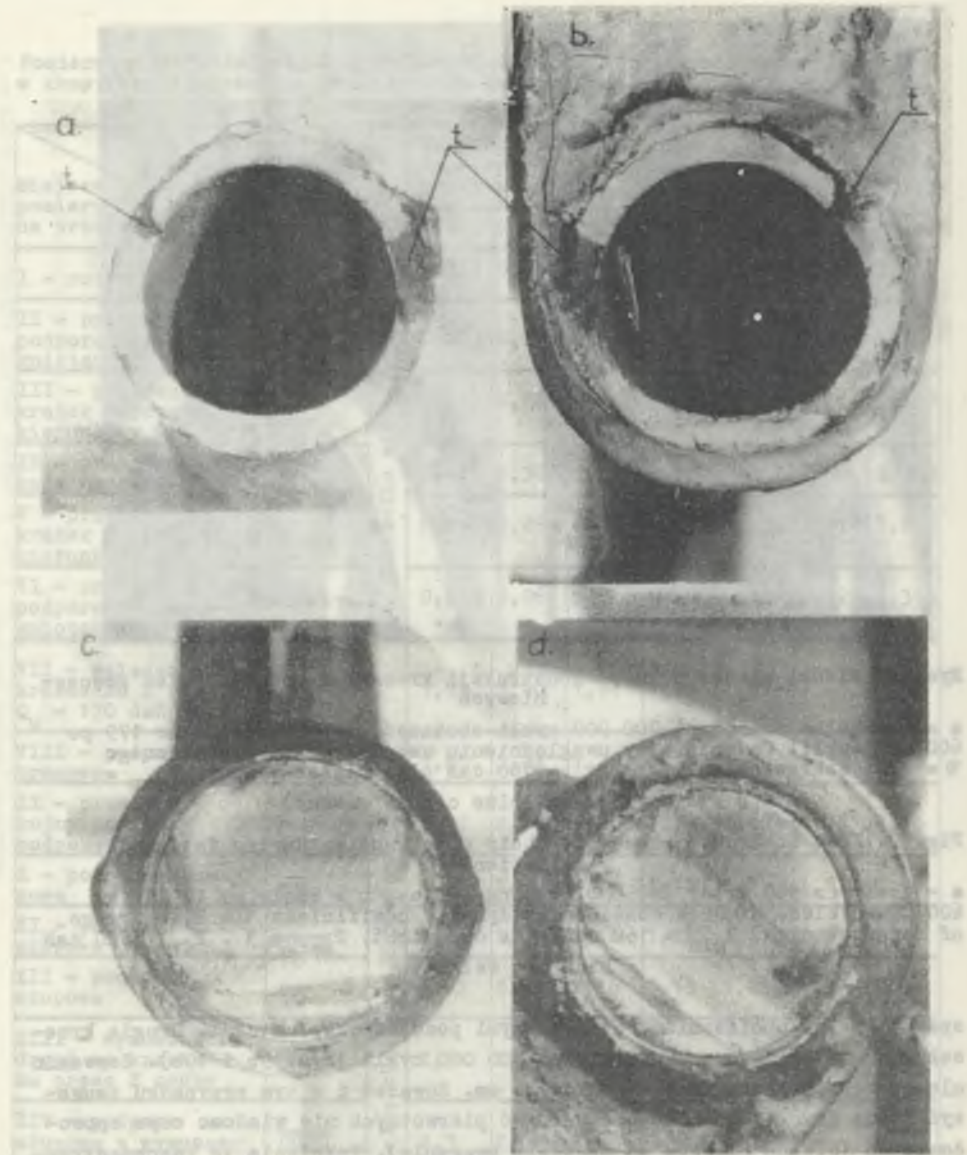
Rys. 9. Widoki miejsc pęknięć konstrukcji krzesełek podczas badań zmęczeniowych

a - krzeszko nr 568 po 200 000 cyklach obciążeń, b - krzeszko nr 179 po 600 000 cyklach. Badania przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 2,4$, zakres zmian siły $P_{\min} = 160$ daN plus ciężar własny, $P_{\max} = 3 \cdot P_{\min}$ (620 daN plus ciężar własny)

Fig. 9. View of broken places of chair construction during fatigue examinations

a - chair nr 568 after 200 000 loading cycles, b - chair nr 179 after 600 000 cycles. Studies considering dynamic coefficient $\psi = 2,4$, range of force changes $P_{\min} = 160$ daN plus own weight, $P_{\max} = 3 \cdot P_{\min}$ (620 daN plus own weight)

spawaniem lub obciążeniami dynamicznymi podczas eksploatacji. Drugie krzeszko nr 179 uległo uszkodzeniu po 600 000 cyklach (rys. 9b i 10b). Zerwaniu uległ sworzni łącznika o średnicy 36 mm. Również i w tym przypadku zauważyć można (rys. 10b) obecność pęknięć pierwotnych nie wiadomo czym spowodowanych (ciemne miejsca na obwodzie sworzni). Pęknięcia te rozprzestrzeniły się na cały przekrój sworzni na skutek obciążeń zmiennych tak, że powstał typowy złom zmęczeniowy sworzni. Trzecie krzeszko o nr 341 uległo również uszkodzeniu po 1069000 cyklach w podobny sposób jak krzeszko nr 568. Z uwagi na negatywne wyniki badań do dalszych badań dostarczone kolejne trzy krzeszka z kolejki. W porozumieniu z Dozorem Technicznym i z dyrekcją kolei obniżono w dalszych badaniach górną granicę zmian ob-

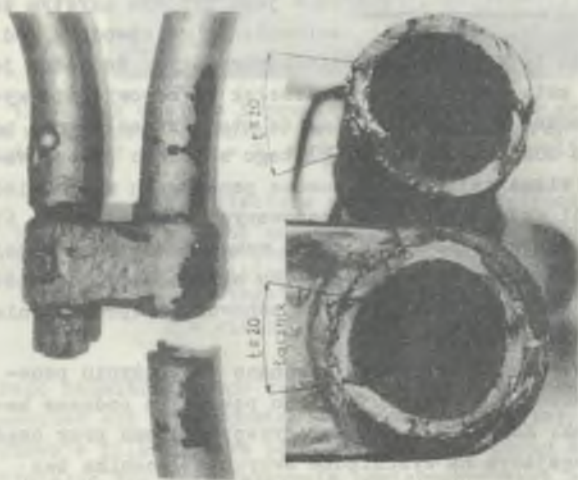


Rys. 10. Widoki przekrojów zmęczeniowych

a, b - rury ramy przekroju przy łączniku krzeselka nr 568, c, d - sworz-
nia łącznika przekroju przy rurze zawiesia krzeselka nr 179, t - pęknięcia
powstałe podczas spawania lub eksploatacji

Fig. 10. View of fatigue fracture

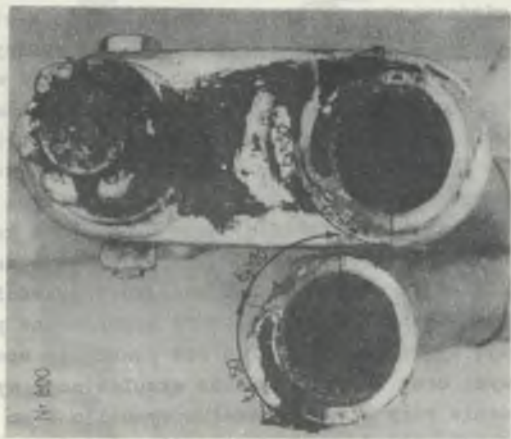
a, b - section frame pipes at the chair connection nr 568, c, d - section
connector bolts at the lifting sling of the chair nr 179, t - cracks cre-
ated during welding or exploitation



Rys. 10. Widoki miejsc i przekrojów zmęczeniowych przekroju rury ramy przy łączniku podczas badań z uwzględnieniem $\phi = 1,8$

a - krzessełko nr 343 po 250000 cyklach, wielkość uszkodzenia rury w wyniku przepalenia materiału podczas spawania i działaniu korozji $t = 2$ cm, b - krzessełko nr 600 po 214000 cyklach, $t = 5$ cm wielkość uszkodzenia rury w wyniku przepalenia materiału podczas spawania i działania korozji, razem $t = 7$ cm, co stanowi 0,5 obrotu rury

Fig. 10. View of places and fatigue fractures of section frame pipe taking into account $\phi = 1,8$
 a - the chair nr 343 after 250000 cycles, the size of pipe damage created during welding and because of corrosion $t = 2$ cm, b - the chair nr 600 after 214000 cycles, $t = 5$ cm the size of pipe damage during welding and because of corrosion, together $t = 7$ cm that is 0,5 of pipe perimeter



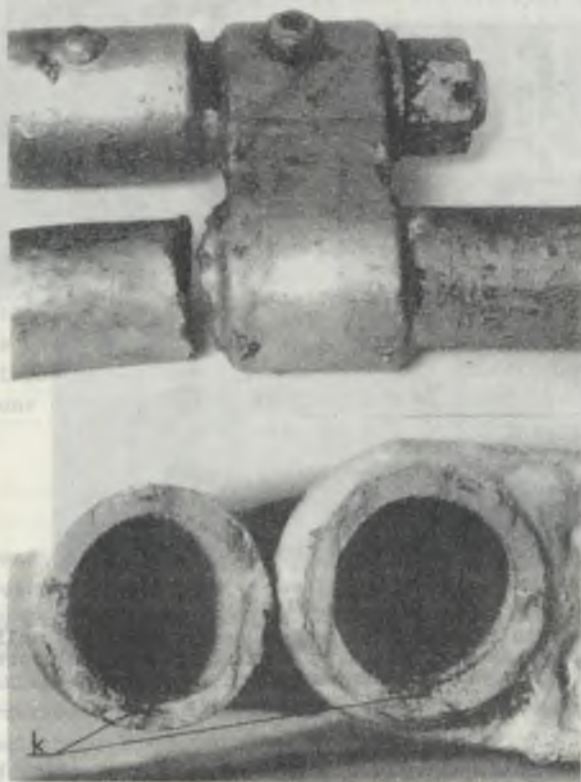
Rys. 11. Widoki miejsc i przekrojów zmęczeniowych przekroju rury ramy przy łączniku podczas badań z uwzględnieniem $\phi = 1,8$

a - krzessełko nr 343 po 250000 cyklach, wielkość uszkodzenia rury w wyniku przepalenia materiału podczas spawania i działaniu korozji $t = 2$ cm, b - krzessełko nr 600 po 214000 cyklach, $t = 5$ cm wielkość uszkodzenia rury w wyniku przepalenia materiału podczas spawania i działania korozji, razem $t = 7$ cm, co stanowi 0,5 obrotu rury

Fig. 11. View of places and fatigue fractures of section frame pipe taking into account $\phi = 1,8$
 a - the chair nr 343 after 250000 cycles, the size of pipe damage created during welding and because of corrosion $t = 2$ cm, b - the chair nr 600 after 214000 cycles, $t = 5$ cm the size of pipe damage during welding and because of corrosion, together $t = 7$ cm that is 0,5 of pipe perimeter

ciążenia tak, że odpowiadało ono uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 1,8$, czyli $P_{\min} = 230 \text{ daN}$, a $P_{\max} = 1,8 \cdot 1,25 \cdot P_{\min} = 2,25 P_{\min} = 518 \text{ daN}$, co po odjęciu ciężaru własnego krzesełka 70 daN daje siły pulsatora $P_{\min} = 160 \text{ daN}$ i $P_{\max} = 450 \text{ daN}$. Krzesełko nr 343 wytrzymało przy tym zakresie zmiany siły 2500000 cykli i uległo uszkodzeniu w postaci pęknięcia rury ramy przy łączniku (rys. 11a). Z oględzin złomu zmęczeniowego wynikało, że w miejscu tym rura była już pęknięta na długości obwodu około 2 cm. Było to pęknięcie koloru czarnego i częściowo koloru brązowego przykryte spoiną. Świadczy to o tym, że przyczyną tego pęknięcia było spawanie (przepalenie materiału) oraz działająca korozja podczas eksploatacji krzesełka. Krzesełko nr 600 przy tym samym zakresie zmian obciążenia pękło w tym samym miejscu jak krzesełko poprzednie (rysunek 11b). W tym krzesełku pierwotne pęknięcie rury spowodowane prawdopodobnie spawaniem i korozją wynosiło 5 cm, a dalsze pęknięcie spowodowane obciążeniami zmęczeniowymi oraz korozją podczas eksploatacji wynosiło 2 cm. Łącznie więc uszkodzenie rury w tym krzesełku wynosiło 7 cm po obwodzie. Uszkodzenia tego nie było widać, ponieważ znajdowało się ono pod spoiną. Następne krzesełko nr 726 badano już przy kolejnym obniżeniu współczynnika dynamicznego do $\psi = 1,7$. Krzesełko to przy współczynniku $\psi = 1,7$ wytrzymało 5000000 cykli. W celu zorientowania się co do rzeczywistej wytrzymałości tego krzesełka poddano je dalszemu badaniu przy współczynniku dynamicznym $\psi = 2$, przy którym wytrzymało jeszcze 720000 cykli. Pęknięcie rury ramy (rys. 12) wystąpiło po 5720000 cyklach również przy łączniku w miejscu spoiny, lecz po przeciwnej stronie łącznika niż to miało miejsce w dwu poprzednich krzesełkach. Pęknięcie jest typowym czystym złomem zmęczeniowym, zauważono jedynie lekkie zaciemnienia na obwodzie od wewnątrz rury. Wyniki badań tego krzesełka świadczyły o tym, że można je było uznać za jedyne z 6 szt. przebadanych krzesełek za odpowiednio wytrzymałe. Ogólnie jednak można było stwierdzić, że stan krzesełek nie pozwala na dalszą bezpieczną ich eksploatację, dlatego zalecono przeprowadzenie dokładnej kontroli wizualnej oraz za pomocą penetrantu niebezpiecznych przekrojów konstrukcji wszystkich eksploatowanych krzesełek, tj 677 sztuk. Niezależnie od powyższego zalecono doraźne wzmocnienie konstrukcji ram krzesełek w pobliżu łącznika w celu dalszej ich eksploatacji do czasu wymiany tych krzesełek na nowe. Zalecono również ponowne przeprowadzenie badań drgań krzesełek podczas eksploatacji.

Badania nieniszczące wszystkich krzesełek wykonano przy użyciu penetrantu w aerozolu, w miejscach w których ujawniono pęknięcia podczas badań zmęczeniowych krzesełek. Kontrolę krzesełek przeprowadzono przy częściowym ich demontażu, polegającym na wysunięciu sworznia łącznika bez zdejmowania krzesełka z trasy kolejki. Usuwno również powłokę farby w miejscach kontrolowanych, które następnie starannie wyczyszczono. Używano trzech płynów w aerozolu o różnych kolorach, a mianowicie płynu wnikającego, zmywającego i utrwalającego. W przypadku pęknięcia lub niedokładnego zgrzania rury ramy krzesełka wypływający ze szczeliny płyn wnikaający,



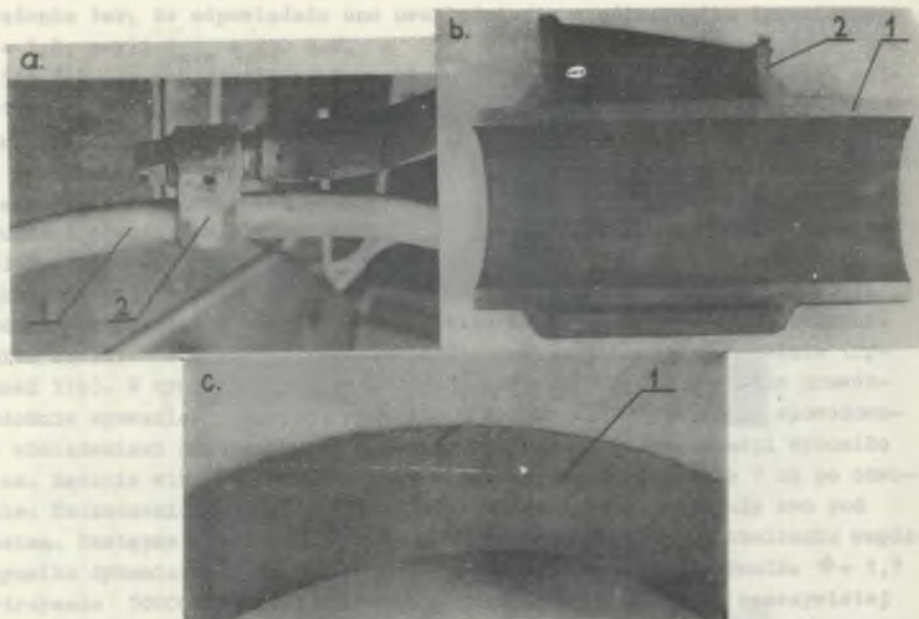
Rys. 12. Widok miejsca i przełomu zmęczeniowego przekroju rury ramy krzesła nr 726 przy łączniku. Krzesło badano przy $\psi = 1,7$ na 5000000 cykli oraz dodatkowo przy $\psi = 2$, wytrzymało 720000 cykli, razem 5700000 cykli obciążeń

k - widoczne działanie korozji od wewnątrz rury

Fig. 12. View of a place and fatigue fracture of section frame pipe of the chair nr 726 at the connector. The chair was examined at $\psi = 1,7$ during 5000000 cycles and additionally at $\psi = 2$ only 720000 cycles were resistant, together 5700000 load cycles

k - visible corrosion inside the pipe

(którego nadmiar usuwano za pomocą płynu zmywającego) po kilku minutach rozpuszczał się w natychmiast zasychającej białej powłoce i zabarwiał ją na różowo w kilkakrotnym powiększeniu w stosunku do szerokości szczeliny, umożliwiając tym samym wykrycie powierzchniowego pęknięcia od $1\div 5\ \mu\text{m}$ szerokości szczeliny w zależności od dokładności przygotowania badanej powierzchni. Za pomocą omówionych badań wykryto pęknięcia w rurach 5 krzesłek, które zostały natychmiast wycofane z eksploatacji. Na rys. 13 przedstawiono przykładowo widok badanego elementu oraz widoki szlifów przekroju



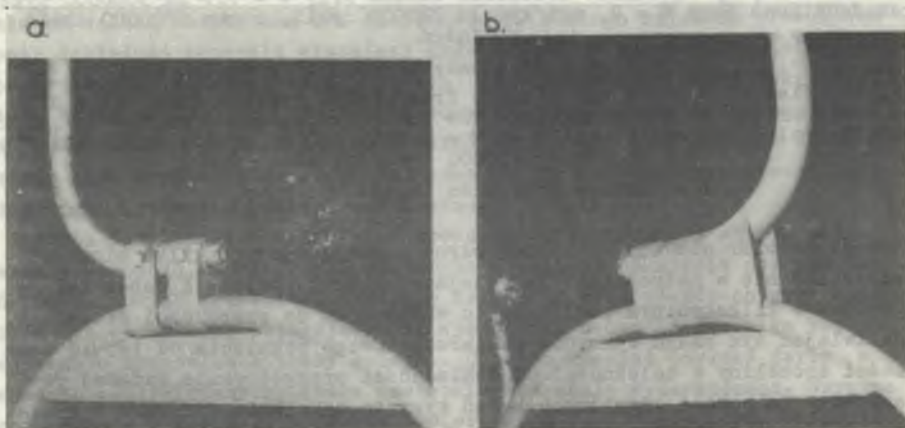
Rys. 13. Widoki

a - badanego elementu krzeselka za pomocą penetrantu, b - szlifu przekroju podłużnego rury ramy w łączniku, c - szlifu przekroju poprzecznego rury ramy

1 - rura, 2 - łącznik

Fig. 13. View

a - of the studied chair element by means of the penetrator, b - micro-section of longitudinal section of frame pipe in the connector, c - micro-section of pipe frame cross-section



Rys. 14. Widoki wzmocnień konstrukcji krzeselkek

Fig. 14. Views of reinforcement of chair construction

podłużnego rury krzesiełka w łączniku i szlifów przekroju poprzecznego rury. Badania nieniszczące za pomocą penetrantu nie wykazały jednak pęknięć rur ram krzesiełek w przekrojach znajdujących się pod spoinami przy łączniku zawiesia (w miejscach które pękały podczas badań zmęczeniowych). Było to niemożliwe, gdyż spoiny szczelnie zakrywały te przekroje i penetrant tam nie wnikał. Fakt wykrycia pęknięć rur w 5 krzesiełkach zaostrzył warunki dalszej eksploatacji pozostałych krzesiełek. Z ponownie przeprowadzonych badań drgań krzesiełek podczas eksploatacji [10] wynikały wnioski podobne do wniosków wynikających z wcześniej przeprowadzonych badań eksploatacyjnych [4]. Zalecono więc wzmocnienie konstrukcji krzesiełek. Cztery wzmocnione krzesiełka jak na rys. 14 poddano badaniom zmęczeniowym przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 2$. Wszystkie cztery krzesiełka przeszły pomyślnie próbę zmęczeniową na $5 \cdot 10^6$ cykli obciążeń każde. Po badaniach nie stwierdzono uszkodzeń ich konstrukcji. Wzmocnione krzesiełka zostały dopuszczone do okresowej eksploatacji do czasu wymiany ich na nowe.

4. WNIOSKI

1. Przeprowadzone obliczenia statycznej wytrzymałości krzesiełka wykazały, że naprężenia występujące w analizowanych przekrojach konstrukcji krzesiełka przy jego obciążeniu użytecznym $Q_u = 160$ daN są znacznie mniejsze od naprężeń dopuszczalnych na zginanie $\sigma_g = 1700$ daN/cm² dla materiału R 45, z jakiego wykonane są rury konstrukcji krzesiełka. Naprężenia statyczne nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 1,6+1,8$ w zależności od przekroju, co odpowiada obciążeniu $P = 460 - 520$ daN i co świadczy o wystarczającej ich wytrzymałości statycznej.

2. Obliczenia teoretyczne wykazały, że najmniejbezpiecznym przekrojem w całej konstrukcji krzesiełka jest przekrój C ramy przy łączniku zawiesia.

3. Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej krzesiełka wykazały, że można przyjąć spełnienie warunku wymaganego współczynnika bezpieczeństwa na zmęczenie I_{zm} w najmniejbezpiecznym przekroju C krzesiełka przy maksymalnej wartości współczynnika dynamicznego $\psi = 1,8$.

4. Z przeprowadzonych podczas eksploatacji krzesiełka badań współczynników dynamicznych ψ wynika, że osiąga on maksymalną wartość $\psi = 2,6$ podczas celowego wymuszania drgań przez pasażerów, a 1,9 podczas wsiadania dwu osób.

5. Przeprowadzone badania zmęczeniowe sześciu krzesiełek wykazały, że przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 1,8+2,4$ pięć krzesiełek uległo zniszczeniu po 200000-2500000 cyklach zmian obciążeń, a więc znacznie mniej niż wymagane przez przepisy $5 \cdot 10^6$ cykli. Jedno krzesiełko wytrzymało próbę zmęczeniową na $5 \cdot 10^6$ cykli przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 1,7$.

6. Badania zmęczeniowe wykazały, że najmniejbezpiecznym miejscem w krzesełku jest przekrój C ramy przy łączniku, w którym znajdują się spoiny. Prawdopodobnie podczas spawania w miejscach tych wystąpiło przepalenie materiału rur sprzyjające ich pękaniu. W przekrojach tych podczas eksploatacji krzesełek rozwijała się intensywnie korozja, której szczególnie sprzyja przemysłowa atmosfera Górnego Śląska. Działanie korozji z uwagi na jej niewidoczność pod spoinami jest najmniejbezpiecznym czynnikiem wpływającym na eksploatację krzesełek.

7. Badania nieniszczące za pomocą penetrantu 677 sztuk eksploatowanych krzesełek wykazały pęknięcia rur w pięciu krzesełkach.

8. Wzmocnione krzesełka przeszły pomyślnie badania zmęczeniowe na $5 \cdot 10^6$ cykli przy uwzględnieniu współczynnika dynamicznego $\psi = 2$. Wykonanie wzmocnień krzesełek było podstawą do dopuszczenia ich do dalszej okresowej eksploatacji do czasu ich wymiany na nowe.

9. Na podstawie przeprowadzonych badań zalecono generalnie dla projektantów nowych krzesełek eliminację połączeń spawanych z elementów nośnych ich konstrukcji.

LITERATURA

- [1] Antoniak J., Carbogno A.: Wytrzymałość zmęczeniowa ustroju nośnego krzesełka kolejki linowej. Problemy Postępu Technicznego. Katowice 1971 Nr 2/32.
- [2] Antoniak J., Carbogno A.: Badania naprężeń dynamicznych w konstrukcji dwuosobowego krzesełka w czasie ruchu kolejki. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo z. 49, Gliwice 1972.
- [3] Carbogno A.: Badania zmęczeniowe osobowych krzesełek kolejek linowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo. Z. 48, Gliwice 1971.
- [4] Carbogno A.: Wytrzymałość krzesełek kolejki linowej "Elka" w WPKiW w Katowicach. Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1977.
- [5] Carbogno A., Dramski St.: Badania eksploatacyjne oraz laboratoryjne dwuosobowych krzesełek kolejki linowej "Czantoria". Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo. Z. 89. Gliwice 1978.
- [6] Carbogno A., Dramski St., Łydka F.: Określenie dalszej przydatności do eksploatacji krzesełek dwuosobowych kolejki linowej w WPKiW w Chorzowie oraz bębnow kotwicznych lin napinających. Ekspertyza nr 84 cz. 1, 2, 3. ZORPOT SIMP. Katowice 1976.
- [7] Dramski St., Carbogno A.: Badania zmęczeniowe wzmocnionych konstrukcji krzesełek dwuosobowych kolejki linowej "Elka" w WPKiW w Katowicach. Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1978.
- [8] Jakubowicz A., Orłowski Z.: Wytrzymałość materiałów. WNT, Warszawa 1966.
- [9] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn. PWN, Warszawa 1973.

- [10] Popowicz A.: Ekspertyza krzesełek kolejki linowej "Elka" w WPKiW w Katowicach. Ekspertyza nr 441/76. Zespół Rzeczoznawców SITG. Katowice 1976.
- [11] Przepisy austriackie. Beadingnisse für den Bau und Betrieb von Seilförderanlagen zur Personen beförderung III teil. Kleinseilbahnen (Einsesellifte SBB) I. 1957. Austria.

Recenzent: Doc. dr inż. Tadeusz ZMYŚŁOWSKI

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ДВУХМЕСТНЫХ СИДЕНИЙ
КАНАТНОЙ ПОДВЕСНОЙ ДОРОГИ "ЕЛКА"

Р е з ю м е

В работе обсуждена конструкция двухместного сидения канатной дороги "Elka", построенной в воеводском парке культуры и отдыха в Katowicach. Представлен способ и результаты расчетов сидения на статичную прочность и прочности на усталость. Показаны методы и результаты исследований на прочность серии из шести сидений после их 10-ти летней эксплуатации в неблагоприятной, из-за коррозии, атмосфере промышленной Горной Силезии. Эти исследования были проведены в Институте механизации горной промышленности Силезского политехнического института. Представлены также результаты исследований динамических коэффициентов Φ , которые появляются в конструкции сидения во время его эксплуатации. В связи с полученными отрицательными результатами исследований сидений на усталость, на которые повлияла проявляющаяся коррозия материала, из которого сделаны сидения, особенно в местах сварочных швов, представлены действия с целью дальнейшей эксплуатации сидений до замены их на новые.

Особенно подробно были проконтролированы, и визуалью и при помощи пене-трации, опасные места всех эксплуатируемых сидений (около 700). Конструкция рам сидений была дополнительно укреплена и исследована на усталость. Результаты исследований были использованы при проектировании новых сидений.

RESISTANCE INVESTIGATIONS OF CHAIRS FOR TWO PERSONS OF THE ROPEWAY "ELKA"

S u m m a r y

The paper presents the construction of a chair for two persons of the ropeway "Elka" built in the Park of Culture and Recreation in Katowice (WPKiW).

The way and results of calculations of resistance-static and fatigue chair construction was presented as well as the method and results of resistance investigations on fatigue of 6 chairs series after 10 years exploitation in an unfavourable atmosphere (because of corrosion) of Upper Silesia.

The studies were carried out at the Institute of Mining Mechanization of the Technical University of Silesia (IMG, Tech. Univ.).

The results of dynamic coefficient investigations in the chair structure during its exploitation were showed.

Because of the negative chair fatigue investigation results that were influenced by corrosion of construction chair pipes especially in the place of welds, immediate action to allow further periodical chair exploitation untill installing the new ones, was undertaken.

Working consisted in exact visual controll and by penetrating dangerous sections of almost 700 exploited chairs.

Frame construction of the chairs was reinforced and was subjected to fatigue examinations.

Obtained results were used to design the new chairs: