

Prof. dr hab. inż. Monika Hardygóra,<sup>1,2</sup> mgr inż. Henryk Komander<sup>1</sup>,  
dr inż. Ryszard Błażej<sup>1</sup>, dr hab. inż. Leszek Jurdziak<sup>1</sup>,

## Metoda prognozowania trwałości zmęczeniowej złączy wieloprzekładkowych taśm przenośnikowych

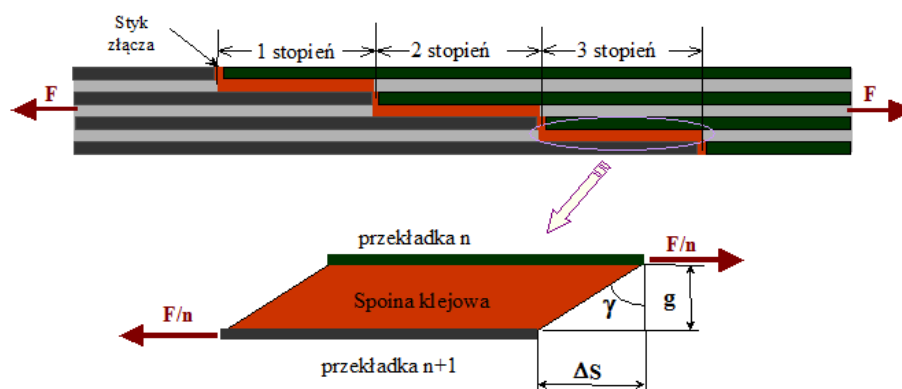
**Streszczenie.** Przedstawiono metodę badań rozkładu naprężeń w spoinie klejowej zakładkowych złączy taśm przenośnikowych wieloprzekładkowych. Określono wpływ właściwości wytrzymałościowych taśm i gumy klejowej na wielkość naprężeń i na trwałość zmęczeniową złączy. Podano zależności pozwalające na obliczenie wielkości naprężeń i prognozowanie trwałości złączy taśm przenośnikowych.

**Słowa kluczowe:** przenośniki taśmowe, taśma przenośnikowa, złącza taśm przenośnikowych

### 1. Wstęp

Wieloprzekładkowe taśmy przenośnikowe produkowane w odcinkach o określonej długości są łączone w dłuższe odcinki lub pętle według schematu pokazanego na rysunku 1.

Z konstrukcji złącza wynika, że w przekrojach styków przekładek jest o jedną przekładkę mniej niż w łączonych taśmach. Strata wytrzymałości taśmy na obszarze złącza jest odwrotnie proporcjonalna do liczby przekładek taśmy.



Rys. 1. Schemat wymiarowy złącza taśm 4 przekładkowych

Fig. 1 Dimensional diagram of the 4 plies conveyor belt splice.

Wyniki badań statycznej wytrzymałości złączy pokazują, że strata wytrzymałości jest większa od tej jaka wynika ze straty jednej przekładki. Jest to spowodowane działaniem naprężeń stycznych w spoinie klejowej, które są największe na stykach przekładek i wzmacniają działanie karbu w tych miejscach złącza.

<sup>1</sup> INSTYTUT GÓRNICITWA Politechniki Wrocławskiej, Zakład Systemów Maszynowych, tel. 71 320 68 60, E-mail: [monika.hardygora@pwr.wroc.pl](mailto:monika.hardygora@pwr.wroc.pl), [henryk.komander@pwr.wroc.pl](mailto:henryk.komander@pwr.wroc.pl), [ryszard.blazej@pwr.wroc.pl](mailto:ryszard.blazej@pwr.wroc.pl); [leszek.jurdziak@pwr.wroc.pl](mailto:leszek.jurdziak@pwr.wroc.pl);

<sup>2</sup> KGHM CUPRUM Ltd. – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław tel. tel. 071 781 22 01

W próbie statycznego rozciągania prawidłowo wykonanego złącza ulega ono zniszczeniu wskutek zerwania przekładek na styku pierwszego lub ostatniego stopnia. W praktyce eksploatacyjnej często dochodzi do rozklejania się styków złącza, które jest początkiem jego zniszczenia. Wynika z tego, iż pod wpływem obciążeń zmęczeniowych wcześniejszemu zniszczeniu ulega spoina klejowa [1,2,3].

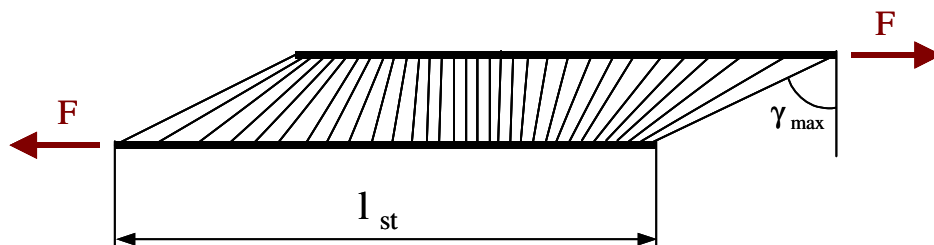
Zagadnienia związane z ustaleniem jakie właściwości taśm przenośnikowych i materiałów wulkanizacyjnych mają zasadniczy wpływ na wielkość naprężeń w spoinie klejowej oraz na ich trwałość zmęczeniową były przedmiotem prac prowadzonych w Laboratorium Transportu Taśmowego Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej [4,5], których wyniki przedstawiono poniżej.

## 2. Badania naprężeń w spoinie klejowej złącza taśm przenośnikowych.

Wielkość naprężeń w spoinie klejowej złącza badano poprzez pomiary kąta odkształcenia postaciowego spoiny  $\gamma$ . Kąt  $\gamma$  definiowany jest jako iloraz bezwzględnego odkształcenia postaciowego  $\Delta S$  i odległości  $g$  pomiędzy przemieszczającymi się krawędziami spoiny pod wpływem działania siły rozciągającej  $F$  (rys.1).

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta S}{g} \quad (1)$$

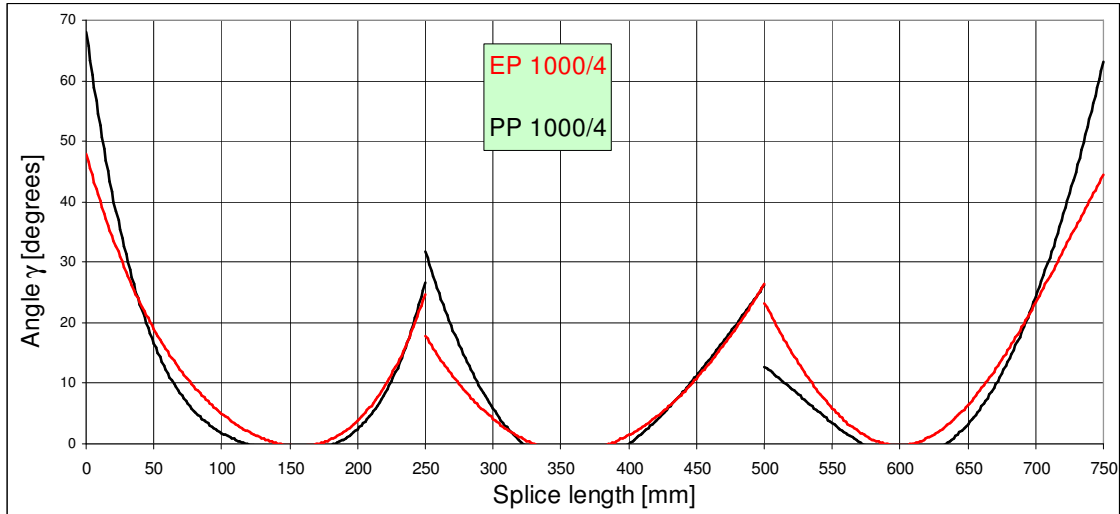
Z uwagi na właściwości przekładek tkaninowych i gumy spoiny klejowej kąt odkształcenia postaciowego  $\gamma$  nie jest jednakowy na całej długości poszczególnych stopni złącza (rys.2) w związku z czym jego pomiar musi się odbywać w wielu punktach na długości spoiny.



Rys. 2. Schemat odkształceń spoiny klejowej na długości stopnia  $l_{st}$  złącza  
Fig. 2 Strain diagram of the adhesive joint along the length of the 1<sup>st</sup> step of a belt splice

Pomiarów kątów  $\gamma$  dokonywano na pełnowymiarowych złączach taśm 4-przekładkowych. Aby uniezależnić wyniki badań od wpływu ewentualnych wad wykonawczych złącza wykonywano w ten sposób, że poszczególne stopnie uzyskiwano poprzez przecinanie przykładek taśmy w określonych miejscach odpowiadających długości stopni.

Próbki do badań o szerokości 50 mm wycinano wzdłuż osi taśmy i obciążano je siłą wywołująca naprężenia o wielkości 15% wytrzymałości taśmy. Na podstawie zmierzonych kątów  $\gamma$  sporządzano wykresy zależności  $\gamma=f(l_x)$ , gdzie  $l_x$  to odległość punktu pomiarowego od miejsca styku przeciętych przekładek. Przykładowe wyniki pomiarów kąta  $\gamma$  po aproksymacji liniami trendu pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Rozkład kątów odkształcenia postaciowego  $\gamma$  w spoinie klejowej na długości złączy EP1000/4 i PP1000/4

Fig. 3 Distribution of non-dilatational strain angles  $\gamma$  in adhesive joint along the length of belt EP1000/4 and PP1000/4 splices

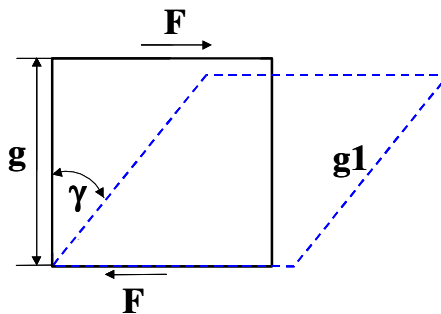
Wykresy zależności  $\gamma=f(l_x)$  aproksymowano liniami trendu i obliczano wydłużenia względne spoiny  $\varepsilon$  z zależności (2):

$$\varepsilon = \frac{1 - \cos \gamma - \varepsilon_t \cdot \nu}{\cos \gamma + \nu \cdot \sin \gamma} \quad (2)$$

gdzie:

$\varepsilon_t$  – wydłużenie względne taśmy przy naprężeniu 15% wytrzymałości taśmy,  
 $\nu$  - współczynnik Poissona gumy klejowej.

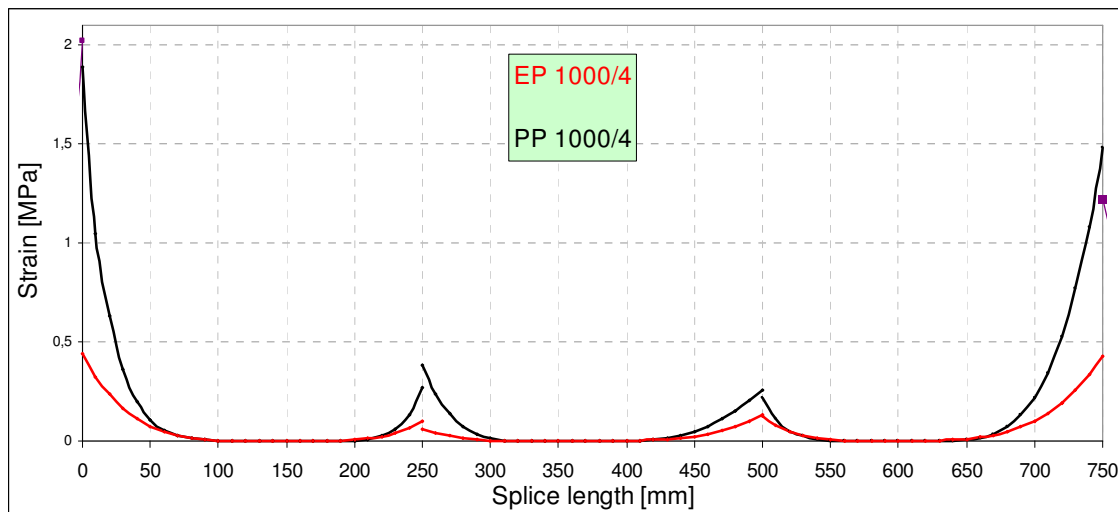
Powyższą zależność określono rozpatrując schemat odkształceń spoiny klejowej przedstawiony na rys 4, przyjmując, że wydłużenie względne spoiny  $\varepsilon=(g_1-g)/g$  i uwzględniając wpływ wydłużenia taśmy oraz współczynnika Poissona gumy klejowej.



Rys. 4. Schemat odkształceń wymiarowych elementu spoiny klejowej złączy.

Fig. 4 Dimensional deformations diagram of adhesive joint component of belt splice.

W wyniku obliczeń uzyskiwano wykresy rozkładu wydłużeń spoiny klejowej na długości złącza  $\varepsilon=f(l_x)$ . Aby uzyskać obraz rozkładu naprężeń w spoinie klejowej na długości złącza przeprowadzono badania gumy klejowej celem uzyskania zależności  $\tau=f(\varepsilon)$ , co pozwoliło na przeliczenie uzyskanych wyników na zależność  $\tau=f(l_x)$ . Przykładowe wyniki obliczeń rozkładu naprężeń w spoinie złączy EP1000/4 i PP1000/4 pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład naprężeń w spoinie klejowej na długości złączy EP1000/4 i PP1000/4  
Fig. 5 Stress distribution in the adhesive joint along the length of splices EP1000 / 4 and PP1000 / 4

Wyniki pomiarów podstawowych właściwości łączonych taśm, właściwości gumy klejowej oraz wyniki badań wielkości naprężeń na zewnętrznych stykach złączy przedstawiono w tabeli 1. Wytrzymałość taśmy na rozciąganie  $R_t$  oraz wydłużeń  $\varepsilon_t$  oznaczono według EN ISO 283:2008, moduł sprężystości taśmy  $M_t$  według EN ISO 9856:2005, wytrzymałość na rozciąganie gumy klejowej według ISO 252:2007, moduł gumy klejowej wg ISO 252:2007 przy wydłużeniu równym 100% osiągniętym po 3 godzinach obciążania próbek ze stałą siłą.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań właściwości wytrzymałościowych taśm oraz naprężeń w spoinie klejowej złączy.

Lp	Właściwości łączonych taśm				Właściwości gumy klejowej		Maksymalne naprężenia w spoinie klejowej $\tau$ [MPa]
	Rodzaj materiału przekładek	Wytrzymałość na rozciąganie $R_t$ [kN/m]	Moduł sprężystości taśmy $M_t$ [kN/m]	Wydłużenie względne przy 15% $R_t$ $\varepsilon_t$ [%]	Wytrzymałość na rozciąganie TS [Mpa]	Moduł gumy $M_g$ [MPa]	
1	PP	1356	4639	6,28	6,2	1,3	1,70
2	PP	1258	4375	5,45	10,9	1,7	1,65
3	EP	1050	12665	1,11	12,4	0,8	0,43
4	EP	997	14717	1,07	15,2	1,2	0,79
5	PP	2359	11030	4,27	7,0	1,4	1,95
6	EP	1771	26577	1,13	6,2	1,3	0,74
7	EP	1942	18683	1,97	7,2	0,8	0,62
8	PP	1752	8697	6,17	9,6	0,9	1,00

W przeprowadzonych badaniach zarówno kąty  $\gamma$  spoiny klejowej jak i moduły gumy spoiny oznaczano po 3 godzinach od momentu ich naprężenia z uwagi na duży wpływ zjawiska pełzania tych materiałów na ich wydłużalność w początkowym okresie działania sił rozciągających.

Wyniki uzyskanych badań zestawionych w tabeli 1 poddano analizie mającej na celu przedstawienie zależności naprężeń  $\tau$  w funkcji zmiennych  $M_t/R_t$  i  $M_g$ . Założono następującą postać tej zależności (3) :

$$\tau = C \left( \frac{M_t}{R_t} \right)^x M_g^y \quad (3)$$

gdzie:

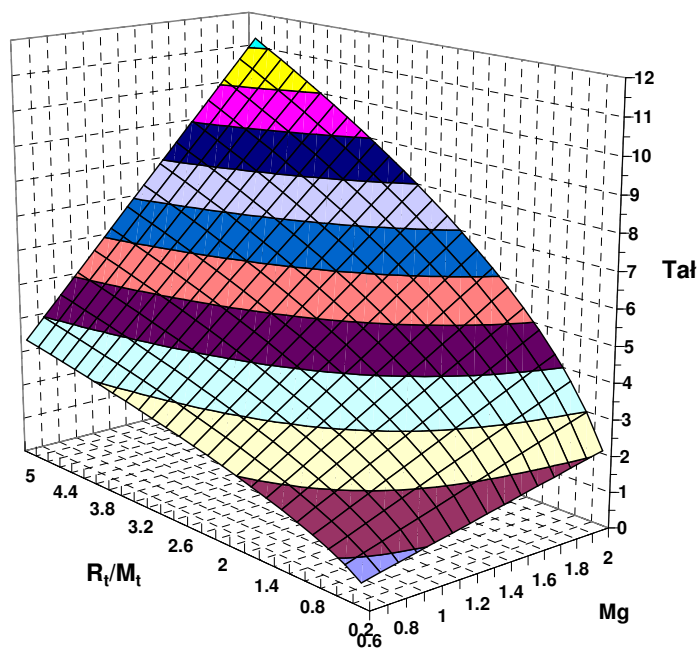
- C – stała,
- x, y – poszukiwane wykładniki potęg.

Powyższą funkcję sprowadzono do liniowej logarytmując obydwie strony równania przez co można było zastosować regresję liniową. Poszukiwane wielkości C, x i y wyznaczono w programie STATGRAPHICS Centurion XV (v.15.2.06, edition Professional) firmy StatPoint Inc., którego licencję akademicką posiada Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. W wyniku przeprowadzonych analiz regresji liniowej wielorakiej z transformacją logarytmiczną dobrano następującą postać poszukiwanej zależności:

$$\tau = 2,434 \left( \frac{R_t}{M_t} \right)^{0,525} M_g^{0,99} \quad (4)$$

Współczynnik korelacji tej funkcji w odniesieniu do wyników badań wyniósł  $R^2=90,6\%$  , a jego skorygowana wartość 86.9%. Z uwagi na to, że uzyskana wartość P w tabeli analizy wariancji ANOVA była mniejsza niż 0.05 (P-value=0.0027), stwierdzono statystyczną zależność pomiędzy zmiennymi na poziomie ufności 95.0%.

Wykres funkcji (4) przedstawiono na rysunku 6.



Rys 6. Zależność zmiennej zależnej  $\tau$  od zmiennych niezależnych  $M_t/R_t$  i  $M_g$  (4).  
 Fig. 6. The relationship of the dependent variable  $\tau$  from independent variables  $M_t/R_t$  and  $M_g$  (4).

Przeprowadzone badania wykazały, że właściwości wytrzymałościowe łączonych taśm i gumy klejowej mają istotny wpływ na wielkość naprężeń w spoinie klejowej. Maksymalne naprężenia występujące na zewnętrznych stykach przekładek złącza w zależności od modułu sprężystości taśmy i modułu gumy mogą różnić się nawet kilkakrotnie jak to widać na przykładzie wykresów przedstawionych na rysunku 5, dla złącza taśm EP100/4 i PP1000/4

Przybliżoną wartość maksymalnych naprężeń w spoinie klejowej można oszacować formułą (5):

$$\tau = 2,4 \sqrt{\frac{R_t}{M_t}} M_g \quad (5)$$

### 3. Badania trwałości zmęczeniowej złączy

W spoinie klejowej złącza poddanego cyklicznym obciążeniom zmęczeniowym kumuluje się ciepło w wyniku czego wzrasta jej temperatura. Wzrost temperatury zależy od wielkości i częstotliwości obciążeń oraz od rodzaju gumy spoiny i właściwości przekładek tkaninowych taśmy. Nawet przy takich samych warunkach obciążeniowych różnica temperatur poszczególnych złączy może dochodzić do kilkudziesięciu stopni. W takim wypadku porównywanie wyników badań pomiędzy poszczególnymi rodzajami złączy nie jest możliwe. W przeprowadzonych badaniach zmęczeniowych założono, że temperatura spoiny klejowej badanych złączy nie może przekraczać zakresu  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Eksperymentalnie ustalono, że powyższy zakres temperatur jest możliwy do uzyskania przy następujących warunkach badań:

- Zakres obciążeń 5% do 20% wytrzymałości taśmy
- Częstotliwość obciążeń 0,3 Hz
- Sinusoidalna charakterystyka obciążeń
- Temperatura otoczenia  $18^{\circ}\text{C}$

Temperaturę spoiny kontrolowano przy pomocy pirometru. Badania wykonywano na próbkach o kształcie wiosełka o szerokości 50mm w części badawczej i szerokości 100 mm w części uchwytowej. Długość całkowita próbek wynosiła 1150mm. Na podstawie analizy wyników badań wielkości naprężeń w spoinach klejowych stopnie środkowe złączy skrócono do 150mm. Stopnie zewnętrzne miały długość standardową. Badania wykonywano na maszynie do badań dynamicznych firmy Zwick-Amster typu HC-25. Jako kryterium oceny trwałości zmęczeniowej złączy przyjęto liczbę cykli zmęczeniowych powodujących rozwarstwienie spoiny o wielkości równej 3mm. Podstawowe parametry badanych złączy oraz uzyskane wyniki liczby cykli zmęczeniowych podano w tabeli 2. W sumie poddano badaniom 12 próbek złączy. Podana w tabeli liczba cykli zmęczeniowych to średnia z dwóch badanych próbek. W tabeli 2 zamieszczono też właściwości złączy, które na podstawie przeprowadzonej analizy miały istotny wpływ na trwałość zmęczeniową. Wytrzymałość adhezyjną T między łączonymi przekładkami oznaczono według EN ISO 252:2008.

, Tabela 2. Zestawienie wyników badań zmęczeniowych złączy.

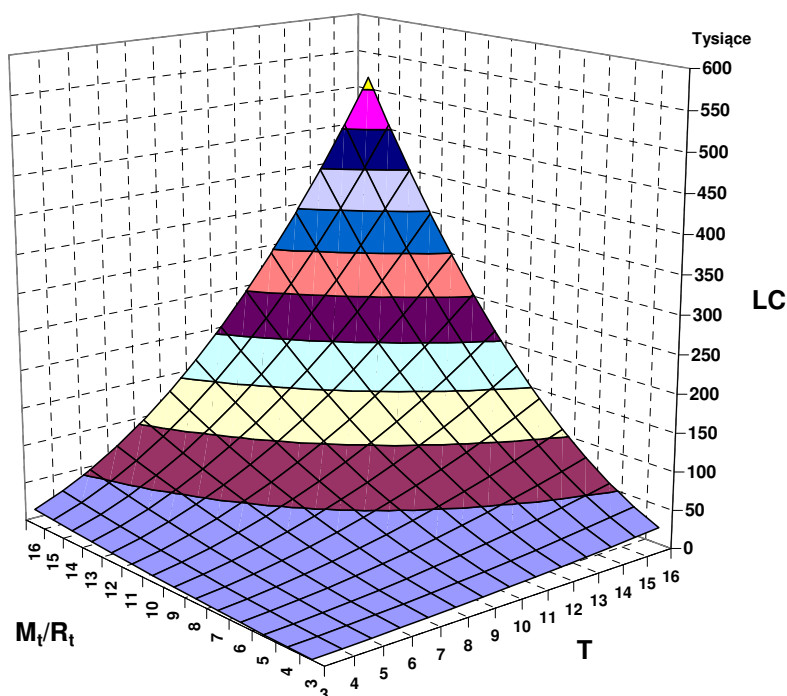
Lp	Rodzaj materiału przekładek	Wytrzymałość na rozciąganie taśmy $R_t$ [kN/m]	Moduł sprężystości taśmy $M_t$ [kN/m]	Wytrzymałość adhezyjna spoiny klejowej $T$ [N/mm]	Liczba cykli zmęczeniowych po których rozpoczyna się rozwarstwianie złącza LC
1	PP	1356	4639	6,3	440
2	EP	1050	12665	11,4	212 000
3	EP	997	14717	14,6	359 000
4	EP	1771	26577	9,2	145 000
5	EP	1942	18683	7,5	8600
6	PP	1752	8697	12,1	1900

Wyniki uzyskane z badań zmęczeniowych zestawionych w tabeli 2 poddano analizie mającej na celu przedstawienie zależności liczby cykli w funkcji zmiennych  $R_t$ ,  $M_t$ ,  $M_g$  i  $T$ .

Założono, że liczba cykli może zależeć od 3 zmiennych:  $R_t/M_t$ ,  $M_g$  i  $T$  i w programie STATGRAPHICS zastosowano dla nich procedurę selekcji modelu regresji wielorakiej. Okazało się, że najlepszym pod względem skorygowanej wartości  $R^2$  jest model oparty na dwóch zmiennych  $R_t/M_t$  i  $T$  ( $R^2=95.04\%$ , a jego wartość skorygowana 91.74%). W wyniku przeprowadzonej analizy nieliniowej regresji wielorakiej uzyskano następującą zależność na liczbę cykli LC :

$$LC = 12,3362\left(\frac{M_t}{R_t}\right)^{1,90881}T^{1,92878} \quad (6)$$

Uzyskane wskaźniki korelacji dla zależności (6) wynoszą:  $R^2=94,7\%$  i jego wartość skorygowana 91,2%. Na rys. 7 przedstawiono zależność opisaną równaniem (6).



Rys 7. Zależność liczby cykli LC od zmiennych niezależnych  $M_t/R_t$  i  $T$  (6).  
Fig. 7 Dependence of the number of cycles LC of the independent  $M_t/R_t$  and  $T$ (6).

Do celów praktycznych zależność (6) można uprościć do postaci (7):

$$LC = 8,05 \left( \frac{M_t}{R_t} \right)^2 T^2 \quad (7)$$

Uzyskane wskaźniki korelacji dla zależności (7) wynoszą:  $R^2=94,6\%$  i jego wartość skorygowana  $94,6\%$ .

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań pokazały jak kształtują się naprężenia w spoinie klejowej na długości poszczególnych stopni złączy wieloprzekładowych taśm przenośnikowych.

Stwierdzono, że ekstremalne wielkości tych naprężeń występujące na stykach złącza zależą głównie od modułu sprężystości łączonej taśmy, jej wytrzymałości oraz od modułu gumy klejowej. Na podstawie otrzymanej zależności (4 lub 5) producenci taśm przenośnikowych i materiałów do ich łączenia mogą tak dobrać ich parametry, aby przy obciążeniu taśmy wynoszącym  $15\%$  jej wytrzymałości maksymalne naprężenia w spoinie klejowej były rzędu  $0,5$  MPa.

Badania zmęczeniowe złączy wykazały, że istotny wpływ na ich trwałość ma jednostkowy moduł sprężystości łączonych taśm  $R_t/M_t$ , oraz wytrzymałość adhezyjna  $T$  gumy klejowej do łączonych przekładek.

Na podstawie badań określono zależność (6, 7) przy pomocy której można obliczyć trwałość zmęczeniową złącza mierzoną liczbą cykli zmęczeniowych powodujących początek rozwarstwiania się styków złącza pod wpływem cyklicznych obciążeń w zakresie od  $5\%$  do  $20\%$  wytrzymałości taśmy.

Stwierdzono, że w zależności od właściwości wytrzymałościowych łączonych materiałów graniczna liczba cykli zmęczeniowych może wynosić od kilkaset do kilkaset tysięcy, co między innymi wyjaśnia przyczynę rozklejania się wielu złączy w praktyce eksploatacyjnej.

Uzyskane wzory na liczbę cykli zmęczeniowych  $LC$  pozwalają w prosty sposób tak dobrać właściwości taśm i materiałów do ich łączenia aby uzyskać wysoką trwałość zmęczeniową złączy a przez to ich większą niezawodność.

Przeprowadzone badania wskazują na istotne parametry wpływające na wytrzymałość i trwałość złączy taśm przekładowych. Wydaje się celowe aby opracowana metodą testować kolejne złącza o zróżnicowanych właściwościach i budowie. Pozwoli to na ewentualne uściślenie wzorów przedstawionych w artykule i bardziej precyzyjne prognozowanie trwałości zmęczeniowej złączy.

Prace badawcze finansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2009-2012 jako projekt rozwojowy Nr R09 001906



## Literatura

- [1] Błazej Ryszard., Hardygóra Monika. Modelling of shear stresses in multiply belt splices. *Bulk Solids Handling*. 2003, 23/4, 234-241.
- [2] Kozhushko G.G., Kopnov V.A. Fatigue strength functions in shear loading of fabric conveyor belts. *International Journal of Fatigue* 1995, 17/8, 539-544
- [3] Mazurkiewicz Dariusz “Problems of numerical simulation of stress and strain in the area of the adhesive-bonded joint of a conveyor belt”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2009, IX/2, 75-91.
- [4] Projekt badawczy nr 4 T 12A 06630 pt: Opracowanie zasad doboru parametrów wytrzymałościowych taśm przenośnikowych i materiałów do ich łączenia celem uzyskania optymalnej wytrzymałości i trwałości połączeń. Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009r.
- [5] Projekt badawczy nr N R09 0019 06 pt: Przenośnik taśmowy o zwiększonej efektywności ekonomicznej i energetycznej zbudowany i eksploatowany wg zasad zrównoważonego rozwoju. Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012r.