


C₃

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT GÓRNICCTWA

Mgr inż. Monika Hardygóra

Metoda doboru taśm tkaninowo-gumowych
z uwzględnieniem losowej zmienności
wytrzymałości przekładek i nierówno-
mierności rozkładu obciążeń

Praca doktorska



Promotor

Prof.dr hab.inż.Tadeusz Żur

Wrocław, 1977

Mr 3540

<u>SPIS TREŚCI</u>	Str
Wstęp	3
Zestawienie ważniejszych oznaczeń	5
Spis rysunków	6
Spis tabel	8
1. Analiza metod doboru taśm przenośnikowych	11
2. Teza i cel pracy	21
3. Badania wstępne	24
3.1. Badanie nowych taśm przenośnikowych i określenie metody pobierania próbek do badań dla oceny wytrzymałości taśm	24
3.2. Badania wytrzymałości taśm używanych	30
3.3. Analiza badań wstępnych	31
4. Matematyczny model tkaninowej taśmy wieloprzekładowej	35
4.1. Określenie teoretycznego modelu tkaninowej taśmy przenośnikowej	35
4.2. Rozwiązanie układu równań dla taśmy sześcioprzekładowej	44
4.3. Opracowanie programów na maszynę cyfrową dla określenia strefy zaburzeń	48
4.4. Wykonanie obliczeń rozkładów obciążeń w przekładkach	51
5. Wpływ zmienności losowej modułów sprężystości przekładek na rozkład naprężeń w przekładkach ...	
6. Zmienność modułu sprężystości przekładek badanych taśm	62

7. Sprawdzające badania laboratoryjne	65
7.1. Cel badań	65
7.2. Metoda badań	65
7.3. Próbki do badań	67
7.4. Wykonanie pomiarów	71
7.5. Analiza błędu	74
7.6. Wyniki pomiarów	76
7.7. Analiza wyników pomiarów	87
8. Analiza wyników badań	97
9. Metoda doboru taśm przenośnikowych	111
10. Wnioski	115
Literatura	118

Wstęp

Efektywność transportu taśmowego w dużym stopniu uzależniona jest od racjonalnego doboru odpowiednich typów taśm do warunków eksploatacji.

W krajowych kopalniach odkrywkowych, placach budów i składowiskach pracuje około 1.010.000 m taśm przenośnikowych. Wartość tych taśm wg. cen z roku 1976 można określić na około 1.124.000.000 zł. Średnia trwałość taśm w przemyśle węgla brunatnego wynosi około 3 lata. W górnictwie skał zwięzłych i w podziemnych kopalniach rud około 1 roku. W przemyśle węgla brunatnego każdego roku wymienia się w tym przemyśle około 70.000 m taśmy wartości 119.000.000 zł. Koszty wydatkowane na zakup taśm w dużej mierze zależne są od odpowiedniego doboru typu i wytrzymałości taśmy a ponadto w dużej mierze zależą od jakości produkowanych taśm i warunków użytkowania ich na przenośniku. Czynniki te w znacznym stopniu mogą przedłużyć trwałość taśm a co za tym idzie podnieść znacznie efektywność całego transportu taśmowego. Prace mające na celu uściślenie doboru taśm oraz uwzględnienie wpływu jakości produkcji na własności taśmy mają więc duże znaczenie praktyczne.

Opracowaniem metody doboru taśm w tym aspekcie zajęto się w niniejszej pracy.

Pragnę tą drogą gorąco podziękować Promotorowi pracy Panu prof. dr hab. inż. Tadeuszowi Żurowi za prowadzenie pracy i cenne wskazówki i uwagi udzielone mi podczas wykonywania pracy.

Chciałabym również serdecznie podziękować koledze mgr inż. Lechowi Gładysiewiczowi za pomoc w realizacji pracy.

Oczuję się w obowiązku wyrazić głęboką wdzięczność pracownikom Laboratorium taśm przenośnikowych COBPGO-Poltegor za umożliwienie prowadzenia badań w tamtejszym laboratorium a szczególnie dziękuję Panu mgr inż. Henrykowi Komanderowi za pomoc podczas wykonywania badań.

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

symbol	wymiar	określenie
B	[m]	szerokość taśmy
E_p	[N/m] przekładki	moduł sprężystości taśmy odniesiony do jednej przekładki
E_g	[N/m ²]	moduł sprężystości gumy
h	[m]	grubość warstwy międzyprzekładkowej
G	[N/m ²]	moduł odkształcenia postaciowego gumy
k_o	bez wymiaru	współczynnik bezpieczeństwa
K_n, K_T	[N/m]	nominalna wytrzymałość na zerwanie taśmy, przekładki
ϵ	bez wym.	wydłużenie względne taśmy
σ_i, σ_o	[N/m] przekładki	naprężenie w i-tej przekładce taśmy, naprężenie wstępne
τ	[N/m ²]	naprężenie styczne
δ	[rad]	kąt odkształcenia postaciowego
z	bez wym.	liczba przekładek w taśmie

SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 3.1. Rozkład naprężeń zrywających w przekroju poprzecznym taśmy. Taśma TEP
- Rys. 3.2. Rozkład naprężeń zrywających w przekroju poprzecznym taśmy. Taśma TP-200
- Rys. 3.3. Spadek wytrzymałości taśmy TK-250 w funkcji czasu pracy na przenośniku
- Rys. 4.4.1. Rozkład naprężeń w dowolnym przekroju taśmy w wyniku zerwania jednej z przekładek
- Rys. 4.1.2. Zachowanie się warstwy międzyprzekładkowej w wyniku zmian naprężeń w współpracujących przekładkach
- Rys. 4.1.3. Elementarne siły działające na wydzielone odcinki taśmy o długości d
- Rys. 4.3.4. Zależność strefy zaburzeń od wartości λ
- Rys. 4.4.1. Rozkłady naprężeń w przekładkach dla trzech wartości λ wariant I

Rys. 4.4.2. Rozkłady naprężeń w przekładkach dla trzech wartości λ wariant II

Rys. 4.4.3. Rozkłady naprężeń w przekładkach dla trzech wartości λ wariant III

Rys. 7.3.1. Schemat szablonu do wbijania szpilek

Rys. 7.6.1. Schemat obliczania kątów

Zdjęcie 7.3.1. Przygotowana próbka do badań

Zdjęcie 7.4.1. Próbka podczas pomiaru strona z przeciętą przekładką

Zdjęcie 7.4.2. Próbka podczas pomiaru strona z nieuszkodzoną przekładką

Rys. 8.1. Wartości mierzonych kątów w strefie zaburzeń

Rys. 8.2. Rozkłady naprężeń w 1:3 przekładce seria 3,
 $G_0 = 40875 \text{ N/m}$

Rys. 8.3. Rozkłady naprężeń w 1 i 3 przekładce seria 3,
 $G_0 = 54500 \text{ N/m}$

SPIS TABEL

Tabela 3.1. Zestawienie parametrów badanych taśm

Tabela 3.2. Zestawienie średnich wytrzymałości na rozciąganie i parametrów zmienności

Tabela 3.3. Zestawienie parametrów badanych taśm używanych

Tabela 3.4. Zestawienie średnich wytrzymałości na rozciąganie i parametrów zmienności taśm używanych

Tabela 4.4.1. Wydruk rozkładu naprężeń w przekładkach

Tabela 6.1. Wydłużenie przekładek

Tabela 6.2. Wartości modułów sprężystości przekładek

Tabela 6.3. Parametry zmienności modułów sprężystości przekładek

Tabela 7.3.1. Własności badanych próbek

Tabela 7.6.1. Wyniki pomiarów, seria 1, siła 4905 N

Tabela 7.6.2. Wyniki pomiarów, seria 1, siła 7357,5 N

Tabela 7.6.3. Wyniki pomiarów, seria 1, siła 9810 N

Tabela 7.6.4. Wyniki pomiarów, seria 2, siła 4905 N

Tabela 7.6.5. Wyniki pomiarów, seria 2, siła 7357,5 N

Tabela 7.6.6. Wyniki pomiarów, seria 2, siła 9810 N

Tabela 7.6.7. Wyniki pomiarów, seria 3, siła 4905 N

Tabela 7.6.8. Wyniki pomiarów, seria 3, siła 7357,5 N

Tabela 7.6.9. Wyniki pomiarów, seria 3, siła 9810 N

Tabela 7.7.1. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 1,

$$\sigma_0 = 27250 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.2. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 1,

$$\sigma_0 = 40875 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.3. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 1,

$$\sigma_0 = 54500 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.4. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 2,

$$\sigma_0 = 27250 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.5. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 2,

$$\sigma_0 = 40875 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.6. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 2,

$$\sigma_0 = 54500 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.7. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 3,

$$\sigma_0 = 27250 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.8. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 3,

$$\sigma_0 = 40875 \text{ N/m}$$

Tabela 7.7.9. Rozkład naprężeń w przekładkach seria 3,

$$G_0 = 54500 \text{ N/m}$$

Tabela 8.1. Rozkład naprężeń w przekładkach próbek
seria 1

Tabela 8.2. Rozkład naprężeń w przekładkach próbek
seria 2

Tabela 8.3. Rozkład naprężeń w przekładkach próbek
seria 3

Tabela 8.4. Długość strefy wpływu zaburzeń

Tabela 8.5. Wartości modułów sprężystości przekładek

Tabela 8.6. Rozkład naprężeń w przekładkach wg. układu
równań 5.2.

Tabela 8.7. Ekstremalne wartości modułów sprężystości

Tabela 8.8. Rozkład obciążeń w przekładkach w punkcie
przecięcia 1 przekładki

Tabela 9.1. Wartości współczynnika k_m

Tabela 9.2. Wartość współczynnika k_m dla taśmy trój-
przekładkowej

1. Analiza stosowanych metod doboru taśm przenośnikowych

W przenośnikach, w których taśma podtrzymuje nosiwo i przenosi siły wzdłużne, konieczne do pokonania oporów ruchu, taśmę dobiera się określając przede wszystkim jej niezbędną wytrzymałość na rozciąganie. Metody doboru taśm opracowywane były stopniowo w miarę wprowadzania do produkcji nowych typów taśm o coraz większej wytrzymałości i wraz z rosnącymi wymaganiami odnośnie możliwie pełnego wykorzystania ich wytrzymałości. Tkaninową taśmę przenośnikową dobierało się dotychczas określając liczbę przekładek oraz ich wytrzymałość na zerwanie w kierunku osnowy. Do obliczenia potrzebnej liczby przekładek konieczna jest znajomość:

- obciążenia taśmy i jego rozkładu wzdłuż taśmy oraz na poszczególne przekładki
- rzeczywistej wytrzymałości przekładek w gotowej taśmie w całym okresie eksploatacji.

Początkowo w Polsce taśmy dobierano na podstawie niemieckiej normy DIN 22101, w której jako podstawę do obliczeń przyjęto maksymalną siłę rozciągającą występującą w taśmie w ruchu ustalonym oraz obliczeniową /nominalną wytrzymałość przekładki/.

Wpływ wszystkich pozostałych czynników uwzględniał wysoki współczynnik bezpieczeństwa. W normie tej [4] maksymalną siłę napięcia w taśmie wyznacza się z zależności:

$$T_1 = P_u \left(1 + \frac{1}{e^{\mu\alpha} - 1} \right) \text{ [KG]} \quad /1.1/$$

a liczbę przekładek oblicza się według wzoru:

$$z = \frac{T_1 s}{B K_z} \quad /1.2/$$

gdzie:

P_u - siła obwodowa na bębnie napędowym w ruchu ustalonym [KG]

μ - średni współczynnik tarcia na bębnie napędowym

α - kąt opasania taśmy na bębnie napędowym

B - szerokość taśmy [cm]

K_z - wytrzymałość obliczeniowa jednej przekładki [KG/cm]

s - współczynnik bezpieczeństwa

zależy od liczby przekładek w taśmie i wynosi od

11 - 13 dla taśm odpowiednio z 3 do 14 przekładkami.

Współczynnik bezpieczeństwa uwzględnia dodatkowe naprężenie wywołane zginaniem, nierównomierne rozłożenie obciążenia na poszczególne przekładki i starzenie się taśmy.

W zastosowaniu do taśm bawełnianych wzór /1.2/ na liczbę przekładek nie budził większych wątpliwości. Gdy jednak weszły w użycie taśmy o przekładkach z tworzyw sztucznych i siły przenoszone przez taśmę wielokrotnie przewyższały wartości dopuszczane dla taśm bawełnianych oraz zastosowano w napędach silniki asynchroniczne pierścieniowe norma DIN 22101 stała się zbyt mało precyzyjna i stosowanie jej prowadziło w pewnych przypadkach do doboru taśm o nadmiernej wytrzymałości w innych taśmę dobierano o zbyt małej wytrzymałości. Głównym problemem okazały się straty wytrzymałości na złączach co wynikało z ograniczenia liczby przekładek praktycznie do 6 przy stosunkowo dużych obciążeniach przenoszonych przez przekładkę.

Projekt zmienionej normy DIN 22101 uwzględnił ten wpływ i wprowadził następujący wzór na obliczenie liczby przekładek z tworzyw sztucznych:

$$z = \frac{T \cdot 147}{B K_z} + 1 \quad /1.3/$$

Stosując w obliczeniach wzór /1.3/ należy przyjmować współczynnik s nie niższy niż 10, a moment rozruchowy powinien być ograniczony do 1,4-krotności.

Scięgosz [28] uwzględnił również naprężenia powstające w przekładkach w wyniku zginania taśmy na bębnie.

Opierając się na wykresie rozciągania przy jednorazowym obciążeniu próbki do momentu zerwania założymy liniowy przebieg zmian naprężeń na odcinku odpowiadającym normalnym warunkom pracy.

Opierając się na tym założeniu, a więc przyjmując

$$G = E \cdot \varepsilon$$

maksymalne naprężenie w zewnętrznej przekładce wynosi

$$\sigma_z = \frac{T}{B \cdot d(z-1)} \cdot \frac{D+2(z-1)d}{D+(z-1)d} + E \frac{(z-1)d}{D+(z-1)d} \quad /1.4/$$

Uwzględniając następujące czynniki:

- straty wytrzymałości na skutek nierównomiernego rozkładu obciążeń na przekładki
- straty wytrzymałości na złączach
- zwiększenie obciążeń podczas rozruchu
- wpływ warunków zewnętrznych /temperatury/

Scięgosz otrzymał wzór na liczbę przekładek w postaci

$$z = \frac{T S_r}{B(K_z - 0,84 \frac{E_p d}{b} S_r)} \quad /1.5/$$

gdzie:

T - maksymalne napięcie w taśmie [KG]

E_p - moduł elastyczności /sprężystości/ przekładkowej odczytywany z wykresów wydłużenia w zależności od naprężenia średniego [KG/cm]

b - stosunek średnicy bębna napędowego do ilości przekładek w taśmie

- d - grubość jednej przekładki po zawulkanizowaniu w taśmie [cm]
 B - szerokość taśmy [cm]
 S_r - współczynnik pewności obejmujący we wzorze /1.5/ osłabienie przekroju w miejscu łączenia, nierównomierne obciążenie przekładek oraz współczynnik bezpieczeństwa.

Całkowity współczynnik przyjmuje się =5 dla bawełny i $S = ,5$ dla tworzyw sztucznych.

Podstawiając do powyższego równania /1.5/ χ współczynnik wykorzystania taśmy otrzymuje się równanie na liczbę przekładek postaci [37]

$$z \gg \frac{S_{\max} \cdot k_e}{B(1000K_r - \frac{18Eg}{\chi})} \quad /1.6/$$

S_{\max} - siła maksymalna występująca w czasie rozruchu / N/

K_r - nominalna wytrzymałość na zerwanie przekładki / N/m/

Eg - moduł zastępczy przy zginaniu /KN/m/

B - szerokość taśmy /m/

χ - współczynnik wykorzystania taśmy

przy czym

$$\chi = \frac{Dh}{h_r} \quad /1.7/$$

D_h - średnica bębna napędowego /m/

h_r - grubość rdzenia taśmy /m/

dobiera się według zaleceń producenta. W obliczeniach kontrolnych oblicza się rzeczywistą wartość X .

Współczynnik bezpieczeństwa k_e przyjmuje się w /1.6/ dla przekładek bawełnianych $k_e = 4,5$ dla przekładek stilonowych $k_e = 5,0$.

Dla taśm, w których stosuje się złącza mechaniczne wytrzymałość taśmy dobiera się odpowiednio do typu i własności stosowanego złącza. Jeżeli brak jest bliższych danych o wytrzymałości zastosowanego złącza i stopniu osłabienia taśmy liczbę przekładek można obliczyć z wzoru:

$$z \geq \frac{S_{\max} k_e}{1000 B \cdot K_r} \quad /1.8/$$

przyjmując $k_e = 9$.

Omówione dotychczas metody doboru taśm przenośnikowych odpowiadały obowiązującym w kraju normom wg. których liczbę przekładek obliczano w taśmie na podstawie nominalnej wytrzymałości przekładki.

Obliczenia przy pomocy wzorów 1.1 - 1.3 stosowane były do taśm bawełnianych. Do taśm z tworzyw sztucznych nie stosuje się ich ze względu na małą ich dokładność mimo, że są proste i wygodne w użyciu.

Metody obliczeń przedstawione wzorami /1.6, 1.7/ można zalecić do obliczania liczby przekładek w taśmie, gdy miarodajna jest wytrzymałość przekładki a nie taśmy jako całości. Uwzględniają one własności użytej taśmy jak też wymiary bębna i przekładek. Dokładna analiza zmian naprężeń w przekładkach zginanej taśmy wykazuje, że w obrębie naprężeń rozciągających, a więc przy dostatecznie dużym napięciu wstępnym w granicach stosowanych obciążeń można przyjąć zastępczą prostą dającą dostatecznie dobre przybliżenie.

Ponieważ w obrębie naprężeń ściskających krzywa ma znacznie mniejsze nachylenie niż w obrębie naprężeń rozciągających, założony wyżej przebieg liniowy można również uznać za bezpieczny wtedy, gdy w przekładkach wystąpią naprężenia ściskające.

Obecnie zgodnie z zaleceniem ISO R-283-1962 dla doboru taśmy miarodajna jest jej wytrzymałość jako całości. Ujęcie takie wymaga odmiennego podejścia do obliczeń od stosowanych dotychczas w praktyce projektowej. Producenci taśm zalecają obliczanie wytrzymałości taśm przy następujących założeniach:

- rzeczywiste naprężenie zrywające taśmę nie może być mniejsze od nominalnego,

- maksymalną siłę w taśmie określa się dla najmniejkorzystniejszych, z tego punktu widzenia, warunków ruchu, najczęściej dla rozruchu
- w obliczeniach uwzględnia się osłabienie taśmy w złączu na skutek przecięcia przekładki
- taśmę oblicza się na zrywanie nie uwzględniając naprężenia zginającego
- spiętrzenie naprężeń spowodowane przecięciem przekładki oraz dodatkowe naprężenia miejscowe uwzględnia współczynnik bezpieczeństwa
- współczynnik bezpieczeństwa przyjmuje się $k_e = 6$.

Przy takich założeniach wytrzymałość nominalną taśmy należy obliczać wg wzoru:

$$K_n = \frac{k_e S_{\max r} z}{B(z-1)} \quad [N/m] \quad /1.9/$$

gdzie:

$S_{\max r}$ - maksymalna siła w taśmie występująca w czasie rozruchu /N/

W górnictwie stosuje się obecnie taśmy tkaninowe z 4 do 6 przekładkami. Mniejsza liczba przekładek /dwie/ występuje jedynie w taśmach dwuprzekładkowych większej liczby nie stosuje się wogóle ze względu na koszty wykonania i sztywność taśmy.

Wytrzymałość taśm tkaninowych z 4 do 6 przekładkami można dobierać na podstawie wzoru

$$K_n = \frac{k'_e S_{\max r}}{B} \quad /N/m/ \quad /1.10/$$

przyjmując

$$k'_e = k_e \cdot \frac{z}{z-1}$$

Ponieważ dla 4 przekładek wartość $\frac{z}{z-1} = 1,33$ a dla 6 przekładek 1,2 w obliczeniach można przyjąć współczynnik bezpieczeństwa $k'_e = 7,5$.

Dla taśm stosowanych obecnie w górnictwie dopuszczalną maksymalną siłę w taśmie zaleca się obliczać z wzoru

$$S_{\max r} = \frac{k_{zr} \cdot B}{k_e} \quad /N/ \quad /1.11/$$

lub sprawdza się współczynnik bezpieczeństwa z wzoru

$$k_e = \frac{K_n \cdot B \cdot /z-1/}{S_{\max r} \cdot z} \quad /1.12/$$

przy czym powinien być spełniony warunek

$$k'_e \geq k_e$$

Przedstawiona metoda obliczeń wg. ISO-R-283 traktująca taśmę jako całość eliminuje jeden z czynników mający wpływ na rzeczywistą wytrzymałość taśmy, mianowicie zmienność własności przekładek. Zakłada ona z dużym uproszczeniem do obliczeń, że osłabienie taśmy w złączeniu występuje tylko na skutek przecięcia przekładki nie uwzględniając powiązań między przekładkami.

2. Teza i cel pracy

Metoda obliczeń taśmy wg zalecenia ISO R-283 traktuje osłabienie taśmy w złączu na skutek przecięcia jednej z przekładek w sposób uproszczony. Metoda ta nie uwzględnia powiązań istniejących między poszczególnymi przekładkami w taśmie oraz wynikającego z tego nierównomiernego rozkładu obciążeń na przekładki wywołanego przecięciem lub uszkodzeniem jednej z nich. Ponieważ zagadnienie rozkładu obciążeń na przekładki dotychczas nie zostało rozwiązane w stosowanych obecnie metodach obliczeń taśm przenośnikowych wpływ ten uwzględnia się przy pomocy współczynnika bezpieczeństwa.

W celu dalszego uściślenia obliczeń taśm konieczne jest dostatecznie precyzyjne ujęcie wpływu nierównomierności rozkładu obciążeń na przekładki wywołanego przecięciem jednej przekładki w złączu oraz określenie długości strefy zaburzeń. Rozwiązanie tego problemu jest celem niniejszej pracy, stawia się przy tym tezę:

"Rozkład naprężeń wzdłużnych w przekładkach spowodowany przecięciem jednej z nich zależy w strefie zaburzeń od położenia uszkodzonej przekładki w przekroju taśmy, liczby przekładek oraz zmienności losowej

modułu sprężystości przekładek. Moduł odkształcenia postaciowego warstwy międzyprzekładkowej i parametry geometryczne taśmy mają istotny wpływ na długość strefy zaburzeń, natomiast wpływ tych wielkości na rozkład naprężeń w przekładkach jest pomijalnie mały".

W celu udowodnienia tej tezy wykonano następujące prace:

- przeprowadzono badania wstępne taśm nowych i używanych w celu określenia sposobu pobierania próbek do badań sprawdzających,
- opracowano teoretyczny model tkaninowej taśmy przenośnikowej i wyprowadzono układ równań różniczkowych opisujących rozkład obciążeń na przekładki w wyniku przecięcia przekładki,
- rozwiązano układ równań różniczkowych dla taśmy sześcioprzekładkowej przy przecięciu kolejno pierwszej, drugiej i trzeciej przekładki,
- opracowano program na maszynę cyfrową Odra 1305 w celu wykonania obliczeń wielkości strefy wpływu zaburzeń,
- opracowano program na maszynę cyfrową w celu wykonania obliczeń rozkładów obciążeń na poszczególne przekładki,

- wyprowadzono układ równań różniczkowych opisujący rozkład obciążeń na przekładki w strefie zaburzeń z uwzględnieniem zmienności własności sprężystych przekładek,
- rozwiązano układ równań różniczkowych z uwzględnieniem zmienności losowej modułów sprężystości dla taśmy trójprzekładkowej,
- na podstawie pomiarów określono zmienność losową modułów sprężystości przekładek,
- wykonano sprawdzające badania laboratoryjne rozkładu naprężeń,
- porównanie obliczeń teoretycznych z wynikami laboratoryjnymi i przeprowadzono analizę,
- określono metodę doboru taśm przenośnikowych.

3. Badania wstępne taśm przenośnikowych

Ażeby możliwe było wybranie do badań sprawdzających próbek najbardziej reprezentatywnych dla danej taśmy przeprowadzono serię badań nowych taśm produkcji krajowej. Jednocześnie przeprowadzono badania taśm używanych w celu określenia spadku wytrzymałości w wyniku eksploatacji taśm.

3.1. Badania nowych taśm przenośnikowych i określenie metody pobierania próbek do badań dla oceny wytrzymałości taśm.

Wykonano laboratoryjne badania wytrzymałości na rozciąganie w kierunku osnowy pięciu typów taśm przenośnikowych: T-Pwz, TK-250, TK-420, TEP-400 i TP-200 stosowanych w kopalniach węgla brunatnego i w górnictwie rud. Zestawienie parametrów badanych taśm zawiera tabela 3.1.

Ażeby uzyskać informacje o zmienności wytrzymałości taśm badania przeprowadzono na całej długości i szerokości wybranych losowo odcinków.

Analizując wyniki badań [12] stwierdzono występowanie nielosowej zmienności wytrzymałości taśm na rozciąganie.

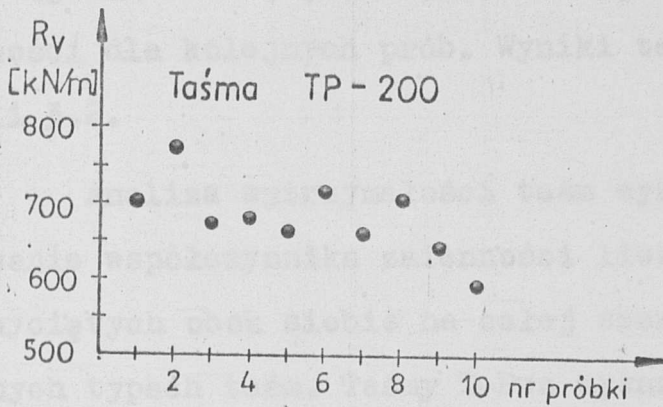
We wszystkich badanych przypadkach, mimo występującej stosunkowo dużej losowej zmienności wytrzymałości poszczególnych próbek, występowała wyraźnie zarysowująca się zmiana wytrzymałości od jednego do drugiego brzegu taśmy.

Tabela 3.1

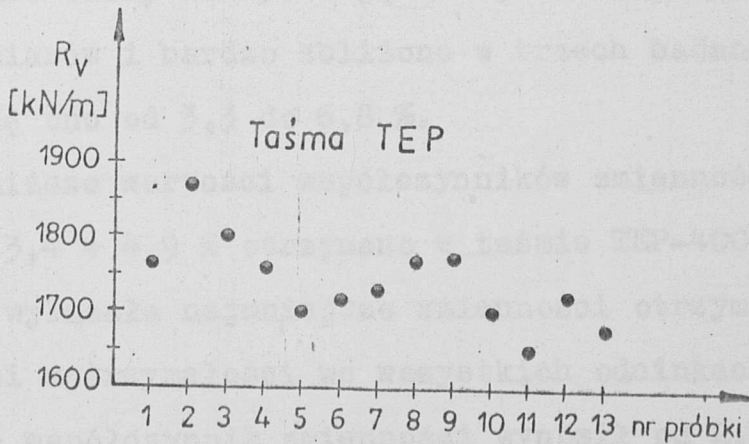
Zestawienie parametrów badanych taśm

Typ taśmy	Nr partii	Ilość przekładek	Grubość okładki		Grubość rdzenia	Masa jednostkowa
			nośnej	bieżnej		
-	-	-	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ²]
T-Pwz	1	5	7	4	10	31,6
T-Pwz	2	5	10	4	12	31,6
TK-250	3	6	7	4	12	27,6
TK-250	4	6	5 + 8	3	10	27,6
TK-250	5	6	6	3	9	27,6
TK-420	6	6	4	2	18	30,4
TEP-400	7	4	8	4	8	25,5
TP-200	8	4	6	4	5	17,0

Na rys. 3.1 i 3.2 przedstawiono reprezentatywne rozkłady wytrzymałości dla przebadanych typów taśm.



Rys.3.2. Rozkład naprężeń zrywających w przekroju poprzecznym taśmy.



Rys.3.1. Rozkład naprężeń zrywających w przekroju poprzecznym taśmy

Dla łatwiejszej interpretacji otrzymanych wyników oraz w celu dokonania porównań poszczególnych typów taśm obliczono średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie każdej partii, wariancję i współczynnik zmienności dla kolejnych prób. Wyniki te zestawiono w tabeli 3.2.

Analiza wytrzymałości taśm wykazuje duże zróżnicowanie współczynnika zmienności liczonego dla próbek wyciętych obok siebie na całej szerokości taśmy w różnych typach taśm. Taśmy T-Pwz wykazują największy rozrzut wyników dochodzący aż do 13 % w jednym wypadku a średnio wahający się w granicach 5 + 10 %. Taśma TP-200 wykazuje rozrzut w granicach 5,8 + 6,8 % natomiast taśmy TK-250 mają mniejsze rozproszenie wyników pomiarów i bardzo zbliżone w trzech badanych partiach waha się ono od 3,3 do 6,8 %.

Nieco niższe wartości współczynników zmienności w granicach 3,4 + 4,9 % otrzymano w taśmie TEP-400. Taśma TK-420 wykazała najmniejsze zmienności otrzymanych wartości wytrzymałości we wszystkich odcinkach półmetrowych współczynnik zmienności wynosił od 2,9 do 3,7 %.

Zestawienie średnich wytrzymałości na rozciąganie i parametrów zmienności

Typ taśmy	Nr partii	Średnia wytrzymałość na rozciąganie	Wariancja	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{R_v}$
-	-	R_v [kN/m]	s^2 /kN/m/ ²	-
TPWZ	1	2469,85	24113,7 + 95768,5	0,058 + 0,13
TPWZ	2	2451,2	12507,9 + 35301,3	0,022 + 0,08
TK-250	3	1723,8	96274,4	0,056
TK-250	4	1795,5	3114,8 + 9155,8	0,03 + 0,0528
TK-250	5	1670,6	3412,1 + 11346,6	0,033 + 0,068
TK-420	6	2620,4	5956,8 + 13378,8	0,029 + 0,0436
TEP-400	7	1694,14	3512,75+ 6738,72	0,034 + 0,049
TP-200	8	659,62	1362,22+ 2202,24	0,058 + 0,068

Dla porównania wykonano badania wytrzymałościowe taśmy angielskiej firmy Greengate Industrial Polymers typ 4/4 LTD.

Dla taśm tych uzyskano tylko zmienność wytrzymałości na rozciąganie o charakterze losowym. Zmienność ta nie przekraczała 2 %. Zmienność wyników pomiarowych wydłużeń była znacznie mniejsza od 1 %.

W związku ze stwierdzeniem występowania tak dużej nielosowej zmienności wytrzymałości taśm krajowych konieczne stało się opracowanie miarodajnej metody pobierania próbek do badania wytrzymałości taśmy na rozciąganie.

W [10] zaproponowano następującą metodę pobierania próbek z taśm produkcji krajowej do oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie:

- odciąć pas o szerokości 100 mm z obu stron taśmy /zgodnie z zaleceniem ISO/
- pobrać po jednej próbce z obu stron taśmy aby sprawdzić, po której stronie taśma ma niższą wytrzymałość
- po stronie o niższej wytrzymałości pobrać cztery dalsze próbki.

Średnią wartość wytrzymałości na zerwanie tych pięciu próbek przyjąć za miarodajną przy określaniu wy-

trzymałości na rozciąganie badanej taśmy w kierunku osnowy.

3.2. Badania wytrzymałości taśm używanych.

Badania taśm używanych przeprowadzono tak samo jak taśm nowych, w tych samych warunkach i tymi samymi metodami.

Zestawienie badanych taśm zawiera tabela 3.3.

Tabela 3.3.

Zestawienie parametrów badanych taśm

Typ taśmy	Nr partii	Liczba przekładek	Grubość okładki		Grubość rdzenia	Czas pracy na przenośniku /orientacyjnie/
			nośnej	bieżnej		
			mm	mm	mm	
TPWz	1	5	7	3	10	5 miesięcy
TK-250	2	6	6	4	10	~1 roku
TK-250	3	6	4	2,5	10	2 lata
TK-250	4	6	3	2	10	3 lata
TK-250	5	6	2 - 2,5	2	10	4 lata
TK-420	6	6	4	1	13	4 lata

33 Wyniki i analiza

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów pełne zestawienie wyników zawarte w [11],[12] określono wartości średnie wytrzymałości, wariancję oraz współczynniki zmienności dla każdej badanej partii.

Wyniki te zestawiono w tabeli 3.4.

Porównując wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie taśm nowych i używanych uderza duża różnica wytrzymałości taśm pracujących powyżej trzech lat i taśm nowych. Taśma TK-420 ma około 40 % niższą wytrzymałość od taśmy nowej w taśmie TK-250 po tym samym okresie czasu pracy spadek wytrzymałości wynosi 30 %.

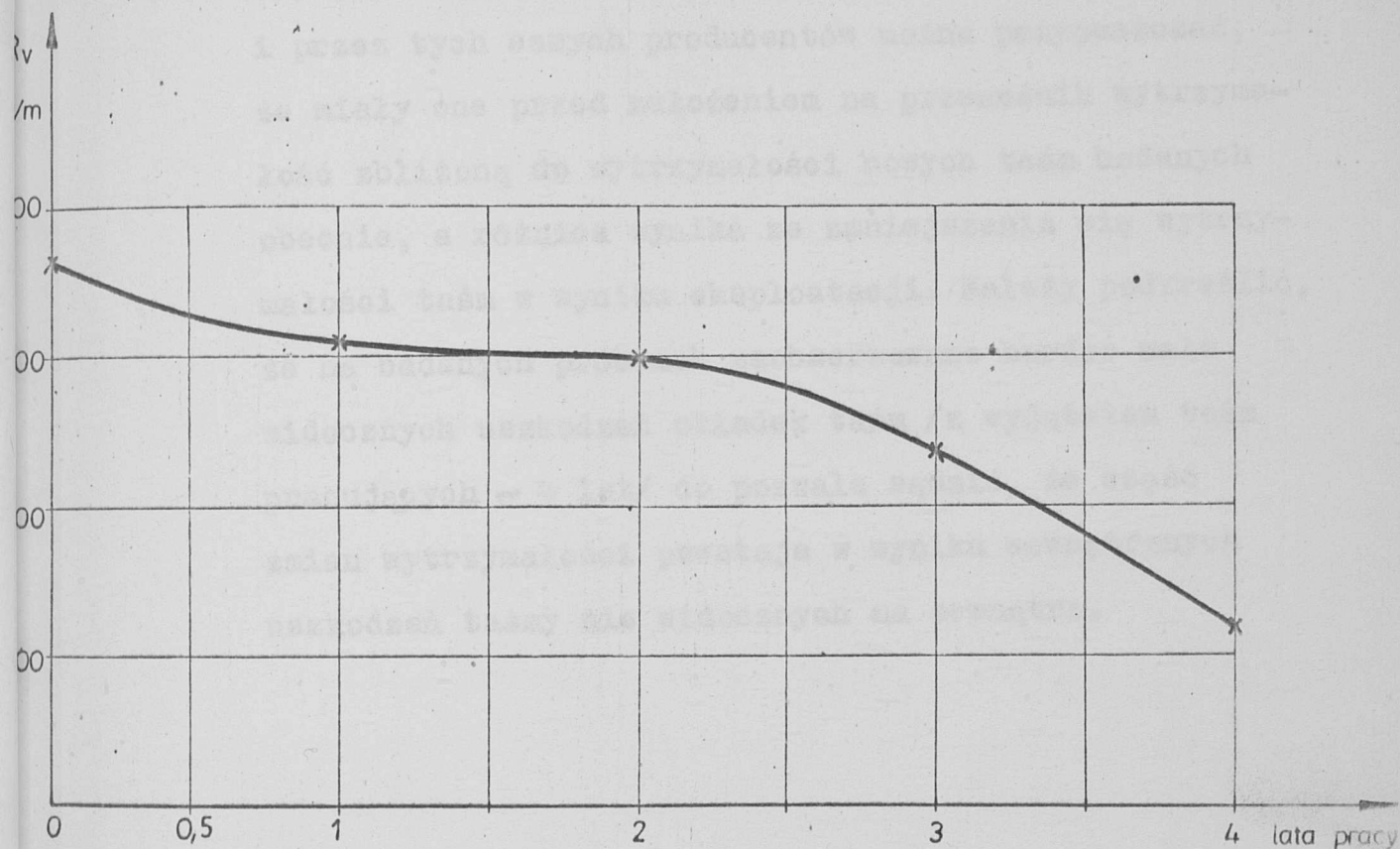
Taśmy pracujące do dwóch lat mają wytrzymałość od 15 - 20 % niższą od nowych np. taśmy TK-250 partia 2 i 3. Natomiast taśmy pracujące kilka miesięcy nie wykazują żadnych różnic w wytrzymałości ani zmian wyglądu dlatego możemy je traktować jako nowe np. taśma TPwz - 1 partia.

Przykładowo na rys. 3.3 przedstawiono spadek wytrzymałości taśmy typu TK-250 w funkcji czasu pracy na przenośniku.

Tabela 3.4

Zestawienie średnich wytrzymałości na rozciąganie
i parametrów zmienności

Typ taśmy	Nr partii	Średnia wytrzymałość na rozciąganie	Wariencja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{R_v}$
-	-	R_v [kN/m]	[kN/m] ²	-
TPwz	1	2442,66	34639,33	0,0688
TK-250	2	1614	17347,058	0,08309
TK-250	3	1607,9	26950,669	0,1021
TK-250	4	1476	67637,029	0,1762
TK-250	5	1240,5	97489,977	0,2517
TK-420	6	1552,85	371995,5	0,3913



Rys. 3.3. Spadek wytrzymałości taśmy TK-250 w funkcji czasu pracy na przenośniku.

W porównywaniu i ocenie wytrzymałości taśm używanych należy zachować pewną ostrożność ponieważ nie wykonano badań porównawczych tych taśm przed założeniem na przenośnik.

Niemniej jednak ponieważ są to taśmy tego samego typu, produkowane przy niezminionej technologii i przez tych samych producentów można przypuszczać, że miały one przed założeniem na przenośnik wytrzymałość zbliżoną do wytrzymałości nowych taśm badanych obecnie, a różnica wynika ze zmniejszania się wytrzymałości taśm w wyniku eksploatacji. Należy podkreślić, że na badanych próbkach zaobserwowano bardzo mało widocznych uszkodzeń okładek taśm /z wyjątkiem taśm pracujących ~ 4 lat/ co pozwala sądzić, że część zmian wytrzymałości powstaje w wyniku wewnętrznych uszkodzeń taśmy nie widocznych na zewnątrz.

4. Matematyczny model tkaninowej taśmy wieloprzekładowej

4.1. Określenie teoretycznego modelu tkaninowej taśmy przENOŚnikowej.

Do teoretycznej analizy rozkładu naprężeń w nieuszkodzonych przekładkach względnie przekładki przeciętej potrzebny jest odpowiedni model taśmy. Stosowany dotychczas w obliczeniach konstrukcyjnych i rozważaniach teoretycznych model taśmy przENOŚnikowej traktuje ją bądź jako ciało jednorodne, bądź też uwzględnia się jej budowę warstwową pomijając jednak wzajemne oddziaływanie przekładek.

E. Zawgorodnyj [34, 35] wprowadził model matematyczny dla taśmy płaskiej z przyłożonym do jednej z zewnętrznych przekładek na łuku opasania naprężeniem stycznym. W modelu [34] naprężenie styczne zostało przyłożone do przekładki zewnętrznej taśmy płaskiej podzielonej na 3 odcinki. Odcinek pierwszy i trzeci reprezentuje strefę zasięgu wpływu bębna, przed geometrycznym punktem zejścia taśmy z bębna.

Na odcinku środkowym taśmy są przekazywane poprzez okładki naprężenia styczne.

Stan naprężeń występujących w przekładkach rdzenia obciążonego zewnętrznym wymuszeniem E. Zawgorodnyj opisuje następującym układem równań:

$$G''_{(n)} - R^2 G_{(n)} + R^2 G_{(n-1)} = 0$$

$$G''_{(i)} - 2R^2 G_{(i)} + R^2 G_{(i-1)} - R^2 G_{(i+1)} = 0$$

$$G''_{(1)} - R^2 G_{(1)} + R^2 G_{(2)} + R^2 \alpha E \frac{d\tau}{dx} = 0$$

$$R^2 = \frac{G}{h_p E_p} \quad \alpha = \frac{E_p}{G}$$

Naprężenie styczne dla przypadku wystąpienia poślizgu sprężystego na całym łuku opasanic wynosi

$$\tau = z \cdot G h_p e^{bx}$$

gdzie:

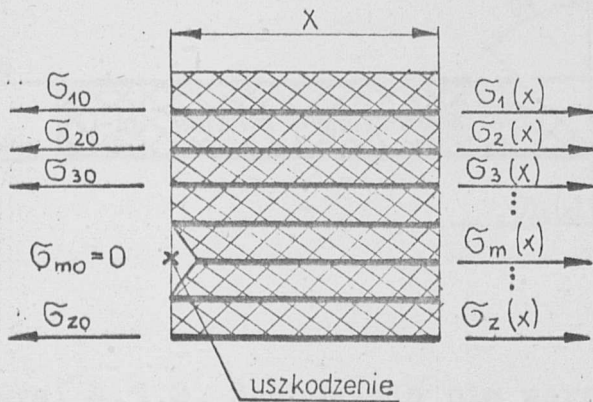
G - średnie naprężenie w przekładce w geometrycznym punkcie zejścia taśmy z bębna napędowego,

b - parametr zależny od współczynnika tarcia taśma + bęben oraz od średnicy bębna.

Model ten nie nadaje się do analizy rozkładu naprężeń w przypadku gdy następuje uszkodzenie lub przecięcie jednej z przekładek w wyniku czego sąsiednie przekładki przejmują na siebie obciążenie przenoszone przez przekładkę uszkodzoną.

Dla odwzorowania taśmy proponuje się matematyczny model taśmy wieloprzekładowej potraktowany jako szeregowo-równoległy układ liniowo sprężysty. Model ten oparty jest na następujących założeniach:

- przekładki traktowane są jako elementy sprężyste podlegające prawu Hooke'a,
- pomija się naprężenia normalne w warstwach międzyprzekładowych oraz^wokładkach taśmy z uwagi na małą wartość modułu sprężystości gumy, nieporównywalną w stosunku do sztywności okładek,
- wyrównanie naprężeń w przekładkach następuje w przekroju poprzecznym taśmy znajdującym się w skończonej odległości od miejsca uszkodzenia,
- w strefie zaburzeń obciążeń warstwa międzyprzekładowa podlega odkształceniom postaciowym,
- guma frykcji traktowana jest jako ciało liniowo sprężyste podlegające prawu Hooke'a
- rozkład naprężeń wewnątrz taśmy w przekroju oddalonym o x do miejsca powstania uszkodzenia w m -tej przekładce przedstawiono dla proponowanego modelu na rysunku 4.1.1.



z - liczba przekładek

m - numer zerwanej przekładki

σ_0 - naprężenie wstępne

$\sigma_m(0) = 0$

Rys. 4.1.1. Rozkład naprężeń w dowolnym przekroju taśmy w wyniku zerwania jednej z przekładek

Rozpatrując stan naprężeń w dwóch sąsiednich przekładkach można opisać zachowanie się związanej z nimi gumy frykcyjnej /rys. 4.1.2/



Rys. 4.1.2. Zachowanie się warstwy międzyprzekładkowej w wyniku zmian naprężeń w współpracujących przekładkach

Kąt odkształcenia postaciowego omawianej warstwy gumy wyrazi się zależnością:

$$\delta_i = \frac{\tau_i}{G} \quad /4.1.1/$$

Dla niewielkich kątów:

$$\delta_i \approx \text{tg } \delta_i = \frac{\Delta_i}{h} \quad /4.1.2/$$

gdzie:

Δ_i = różnica wydłużeń dwóch współpracujących z omawianą warstwą przekładek [m]

h - grubość warstwy międzyprzekładkowej [m]

w przyjętym modelu $h = \text{const}$

Z połączenia zależności 4.1.1. i 4.1.2 otrzymano:

$$\Delta_i = \frac{h}{G} \tilde{\tau}_i$$

/4.1.3/

Różnica wydłużeń Δ_i powstaje wskutek różnic obciążeń występujących w przekładkach w strefie sąsiadującej z miejscem występowania uszkodzenia

$$\Delta_i(x) = \frac{1}{E_p} \int_0^x (\sigma_{(i+1)} - \sigma_0) dx - \frac{1}{E_p} \int_0^x (\sigma_i - \sigma_0) dx$$

/4.1.4/

gdzie:

E_p - moduł sprężystości przekładek [N/m]

x - odległość od miejsca powstania uszkodzenia [m] /zmienia się w granicach od 0 do l_w , gdzie l_w jest długością strefy zaburzeń naprężeń/.

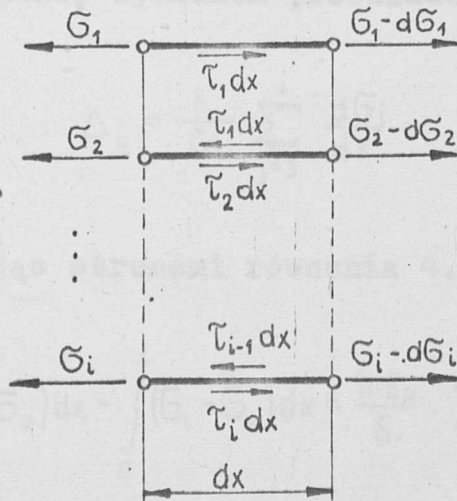
Równanie 4.1.4 słuszne jest dla warstw frykcyjnych nie sąsiadujących bezpośrednio z przekładką uszkodzoną. Ponieważ w przekładce uszkodzonej / m -tej/ naprężenie $\sigma_m(x)$ zmienia się w granicach od 0 do σ_0 /w pozostałych przekładkach $\sigma_i(x)$ zmienia się w granicach od σ_{i0} do σ_0 /.

Równania opisujące różnicę wydłużeń $\Delta_{(m-1)}$ i Δ_m mają następującą postać:

$$\Delta_{(m-1)}(x) = \frac{1}{E_p} \int_0^x \sigma_m dx - \frac{1}{E_p} \int_0^x (\sigma_{(m-1)} - \sigma_0) dx \quad /4.1.5/$$

$$\Delta_m(x) = \frac{1}{E_p} \int_0^x (\sigma_{(m+1)} - \sigma_0) dx - \frac{1}{E_p} \int_0^x \sigma_m dx \quad /4.1.6/$$

Naprężenia styczne w i-tej warstwie frykcyjnej można określić z równowagi wydzielonego elementu taśmy o długości dx /rys. 4.1.3/



Rys. 4.1.3. Elementarne siły działające na wydzielone odcinki taśmy o długości dx .

Równania równowagi poszczególnych elementów przekładek są następujące:

$$\begin{aligned}\tau_1 dx &= dG_1 \\ \tau_1 &= \frac{dG_1}{dx} \end{aligned} \quad /4.1.7/$$

$$\begin{aligned}(\tau_1 - \tau_2) dx &= dG_2 \\ \tau_1 &= \frac{dG_2}{dx} + \tau_2 \\ \tau_1 &= \frac{dG_1}{dx} + \frac{dG_2}{dx} \end{aligned} \quad /4.1.8/$$

$$\tau_i = \frac{dG_i}{dx} + \tau_{i-1} \quad /4.1.9/$$

$$\tau_i = \sum_{j=1}^i \frac{dG_j}{dx}$$

Łącząc zależności 4.1.3 i 4.1.9 otrzymano wzór określający różnicę wydłużeń przekładek Δ_i :

$$\Delta_i = \frac{h}{G} \sum_{j=1}^i \frac{dG_j}{dx} \quad /4.1.10/$$

Porównując stronami równania 4.1.4 i 4.1.10. otrzymano:

$$\int_0^x (G_{i+1} - G_0) dx - \int_0^x (G_i - G_0) dx = \frac{h \cdot E_p}{G} \sum_{j=1}^i \frac{dG_j}{dx} \quad /4.1.11/$$

W dalszych obliczeniach wygodnie jest dokonać podstawienia:

$$\frac{G}{h \cdot E_p} = \lambda^2 \quad /4.1.12/$$

Przy przyjętych założeniach wartość λ w sposób jednoznaczny określa własności sprężyste przekładek oraz gumy międzyprzekładkowej.

Upochodniając stronami równanie 4.1.11 otrzymano:

$$\sigma_{i+1} - \sigma_i = \lambda^{-2} \sum_{j=1}^i \frac{d^2 \sigma_j}{dx^2} \quad /4.1.13/$$

Równanie 4.1.13 jest słuszne dla $1 \leq i < /m-1/$ oraz dla $z \geq i > m + 1$

Analogiczne równania dla dwóch warstw gumy frykcyjnej sąsiadujących z przekładką uszkodzoną mają następującą formę:

$$\sigma_m - \sigma_{m-1} + \sigma_0 = \lambda^{-2} \sum_{j=1}^{m-1} \frac{d^2 \sigma_j}{dx^2} \quad /4.1.14/$$

$$\sigma_{m+1} - \sigma_m - \sigma_0 = \lambda^{-2} \sum_{j=1}^m \frac{d^2 \sigma_j}{dx^2} \quad /4.1.15/$$

Równania 4.1.13, 4.1.14, 4.1.15 tworzą układ z - 1 równań różniczkowych /gdzie z oznacza liczbę przekładek w taśmie/. Brakującą zależność uzupełnia równanie równowagi dowolnego przekroju taśmy:

$$\sum_{i=1}^z \sigma_i = z \sigma_0 \quad /4.1.16/$$

4.2. Rozwiązanie układów równań dla taśmy sześcioprzekładowej.

W celu przeanalizowania otrzymanych zależności dla konkretnego rodzaju taśmy podjęto obliczenia rozkładu obciążeń taśmy sześcioprzekładowej.

Rozpatrzono następujące warianty:

1. zerwaniu ulega pierwsza przekładka
2. zerwaniu ulega druga przekładka
3. zerwaniu ulega trzecia przekładka

Odpowiednie układy równań różniczkowych mają postać:

wariant 1

$$\begin{cases} \lambda^2 (\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_0) = \sigma_1'' \\ \lambda^2 (\sigma_3 - \sigma_2) = \sigma_1'' + \sigma_2'' \\ \lambda^2 (\sigma_4 - \sigma_3) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' \\ \lambda^2 (\sigma_5 - \sigma_4) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' \\ \lambda^2 (\sigma_6 - \sigma_5) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' + \sigma_5'' \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 = 6\sigma_0 \end{cases} \quad /4.2.1/$$

wariant 2

$$\begin{cases} \lambda^2 (\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_0) = \sigma_1'' \\ \lambda^2 (\sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_0) = \sigma_1'' + \sigma_2'' \\ \lambda^2 (\sigma_4 - \sigma_3) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' \\ \lambda^2 (\sigma_5 - \sigma_4) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' \\ \lambda^2 (\sigma_6 - \sigma_5) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' + \sigma_5'' \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 = 6\sigma_0 \end{cases} \quad /4.2.2/$$

wariant 3

$$\begin{cases} \lambda^2(\sigma_2 - \sigma_1) = \sigma_1'' & /4.2.3/ \\ \lambda^2(\sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_0) = \sigma_1'' + \sigma_2'' \\ \lambda^2(\sigma_4 - \sigma_3 - \sigma_0) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' \\ \lambda^2(\sigma_5 - \sigma_4) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' \\ \lambda^2(6\sigma_0 - \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4 - 2\sigma_5) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' + \sigma_5'' \end{cases}$$

Warunki początkowe dla trzech układów równań są następujące:

$$x=0 \quad \sigma_1 = 0 \quad /wariant 1/$$

$$x=0 \quad \sigma_2 = 0 \quad /wariant 2/ \quad /4.2.4/$$

$$x=0 \quad \sigma_3 = 0 \quad /wariant 3/$$

$$x=l_w \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = \sigma_0$$

$$x=l_w \quad \sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3' = \sigma_4' = \sigma_5' = \sigma_6' = 0$$

Każdy z układów sześciu równań da się sprowadzić do jednego równania różniczkowego 10-tego stopnia [22,23,24,25] /w przypadku innej liczby przekładek otrzymuje się równanie $2/z - 1/$ stopnia/.

Przykładowo przedstawia się rozwiązanie układu równań dla pierwszego wariantu.

Rozwiązanie układu /4.2.1/ przedstawia się następująco:

Naprężenie w kolejnych przekładkach wyrażamy za pomocą

σ_1 i jego pochodnych

$$\sigma_2 = \frac{1}{\lambda^2} \sigma_1'' + \sigma_1 + \sigma_0$$

$$\sigma_2'' = \frac{1}{\lambda^2} \sigma_1'''' + \sigma_1''$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{\lambda^2} (\sigma_1'' + \sigma_2'') + \sigma_2 = \frac{1}{\lambda^4} \sigma_1'''' + \frac{3}{\lambda^2} \sigma_1'' + \sigma_1 + \sigma_0$$

/4.2.5/

$$\sigma_3'' = \frac{1}{\lambda^4} \sigma_1'''''' + \frac{3}{\lambda^2} \sigma_1'''' + \sigma_1''$$

$$\sigma_4 = \frac{1}{\lambda^2} (\sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'') + \sigma_3 = \frac{1}{\lambda^6} \sigma_1'''''' + \frac{5}{\lambda^4} \sigma_1'''' + \frac{6}{\lambda^2} \sigma_1'' + \sigma_1 + \sigma_0$$

$$\sigma_4'' = \frac{1}{\lambda^6} \sigma_1'''''''' + \frac{5}{\lambda^4} \sigma_1'''''' + \frac{6}{\lambda^2} \sigma_1'''' + \sigma_1''$$

$$\sigma_5 = \frac{1}{\lambda^2} (\sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'') + \sigma_4 = \frac{1}{\lambda^8} \sigma_1'''''''' + \frac{7}{\lambda^6} \sigma_1'''''' + \frac{15}{\lambda^4} \sigma_1'''' + \frac{10}{\lambda^2} \sigma_1'' + \sigma_1 + \sigma_0$$

$$\sigma_5'' = \frac{1}{\lambda^8} \sigma_1'''''''''' + \frac{7}{\lambda^6} \sigma_1'''''''' + \frac{15}{\lambda^4} \sigma_1'''''' + \frac{10}{\lambda^2} \sigma_1'''' + \sigma_1''$$

Z ostatniego równania w układzie równań /4.1.1/, które jest warunkiem równowagi układu obliczamy σ_6 i wstawiamy ją do równania piątego w układzie /4.2.1/.

Z tego równania możemy już określić jedno równanie różniczkowe:

$$\lambda^2 (6\sigma_0 - \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4 - 2\sigma_5) = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' + \sigma_5'' \quad /4.2.6/$$

po podstawieniu do /4.2.6/ zależności /4.2.5/ otrzymujemy równanie różniczkowe 10-tego stopnia postaci:

$$\sigma_0 - 6\sigma_1 - \frac{35}{\lambda^2} \sigma_1'' - \frac{56}{\lambda^4} \sigma_1'''' - \frac{36}{\lambda^6} \sigma_1'''''' - \frac{10}{\lambda^8} \sigma_1'''''''' - \frac{1}{\lambda^{10}} \sigma_1'''''''''' = 0$$

podstawiając $\frac{r^2}{\lambda^2} = p$ otrzymamy równanie charakterystyczne:

/4.2.7/

$$p^5 + 10 p^4 + 36 p^3 + 56 p^2 + 35 p + 6 = 0$$

rozwiązaniem tego równania są następujące pierwiastki:

$$p_1 = -2 \quad r_{1,2} = \pm \sqrt{2} \lambda_i$$

$$p_2 = -3 \quad r_{3,4} = \pm \sqrt{3} \lambda_i$$

$$p_3 = -1 \quad r_{5,6} = \pm \lambda_i$$

$$p_4 = -2 - \sqrt{3} \quad r_{7,8} = \pm \sqrt{2 - \sqrt{3}} \lambda_i$$

$$p_5 = -2 + \sqrt{3} \quad r_{9,10} = \pm \sqrt{2 + \sqrt{3}} \lambda_i$$

Cechą otrzymanych równań jest to, że dla taśmy sześcioprzekładowej dla każdego wariantu równanie charakterystyczne jest tej samej postaci 4.2.6 oraz, że w każdym przypadku niezależnie od liczby przekładek uzyskuje się jako rozwiązanie równań charakterystycznych wyłącznie pierwiastki urojone. W związku z tym szukane funkcje rozkładu naprężeń są zawsze sumą funkcji harmoniczných. Przykładowo wartość G_1 /w I wariancie/ wyraża się wzorem:

$$\begin{aligned} G_1 = & \frac{1}{6} G_0 + c_1 \sin \lambda \sqrt{2} x + c_2 \cos \lambda \sqrt{2} x + c_3 \sin \lambda \sqrt{3} x + \\ & + c_4 \cos \lambda \sqrt{3} x + c_5 \sin \lambda x + c_6 \cos \lambda x + c_7 \sin \lambda \sqrt{2 - \sqrt{3}} x + \\ & + c_8 \cos \lambda \sqrt{2 - \sqrt{3}} x + c_9 \sin \lambda \sqrt{2 + \sqrt{3}} x + \\ & + c_{10} \cos \lambda \sqrt{2 + \sqrt{3}} x \end{aligned} \quad /4.2.8/$$

4.3. Program ma maszynę cyfrową dla określenia wielkości strefy wpływu zaburzeń.

Rozwiązanie przedstawionego wyżej równania różniczkowego jest dosyć proste i typowe. Wiele natomiast trudności następuje przy wyznaczeniu stałych całkowania oraz długości strefy zaburzeń l_w . Ze względu na to, że stałe całkowania są funkcjami długości l_w obliczenia te należy prowadzić metodą kolejnych przybliżeń. W tym celu ułożono macierz kwadratową 10-tego stopnia z kolejnych pochodnych σ_1 . Wartości tych pochodnych obliczono z warunków początkowych dla $x = l_w$ z równań /4.2.5/. Prawe strony macierzy dla kolejnych wariantów wynoszą odpowiednio:

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} \text{I} \\ b_j \\ j=1,10 \end{array} \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \frac{5}{6} \sigma_0 \\ 0 \\ -\sigma_0 \\ 0 \\ 2\sigma_0 \\ 0 \\ -5\sigma_0 \\ 0 \\ 14\sigma_0 \\ 0 \end{array} \right] &
 \begin{array}{c} \text{II} \\ b_j \\ j=11,20 \end{array} \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{6} \sigma_0 \\ 0 \\ \sigma_0 \\ 0 \\ -3\sigma_0 \\ 0 \\ 9\sigma_0 \\ 0 \\ -28\sigma_0 \\ 0 \end{array} \right] &
 \begin{array}{c} \text{III} \\ b_j \\ j=21,30 \end{array} \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{6} \sigma_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_0 \\ 0 \\ -5\sigma_0 \\ 0 \\ 20\sigma_0 \\ 0 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}$$

/4.3.1/

$$B_{(j)} = \begin{cases} b_j^{\text{I}} & j = 1,10 \\ b_j^{\text{II}} & j = 11,20 \\ b_j^{\text{III}} & j = 21,30 \end{cases}$$

Następnie stosując podstawienia:

$$F(I, J, X) = R(J)^{I-1} \sin(\lambda R(J)X + (I-1) \frac{\pi}{2})$$

/4.3.2/

$$G(I, J, X) = R(J)^{I-1} \cos(\lambda R(J)X + (I-1) \frac{\pi}{2})$$

gdzie: $R/J/$ kolejne pierwiastki równania /4.2.6/

zapisano macierz pochodnych:

$$a_{i, 2j-1} = F(i, 2j-1, x)$$

$$a_{i, 2j} = G(i, 2j, x)$$

Dodając dla każdego wariantu kolejno warunki początkowe $x = 0$ /4.2.4/ na podstawie których zapisujemy funkcje charakterystyczne przy przyjętych wyżej oznaczeniach

$$\Phi_I(l) = \frac{1}{6} + \sum_{j=1}^5 G(1, 2j, 0) X(2j)$$

$$\Phi_{II}(l) = \frac{1}{6} + \sum_{j=1}^5 G(1, 2j, 0) X(10+2j) + \sum_{j=1}^5 G(3, 2j, 0) X(10+2j)$$

$$\Phi_{III}(l) = \frac{1}{6} + \sum_{j=1}^5 G(5, 2j, 0) X(20+2j) + 3 \sum_{j=1}^5 G(3, 2j, 0) X(20+2j) + \sum_{j=1}^5 G(1, 2j, 0) X(20+2j)$$

Nie podano w funkcjach sum sinusów, gdyż dla $x = 0$ wynoszą one 0.

Dla tak przyjętego układu napisano program na maszynę cyfrową, która tablicowała wartości funkcji charakterystycznych $\Phi(l)$ jednocześnie dla trzech wariantów przy skoku l co 0,005 m.

Z otrzymanych serii obliczeń wybieramy l_w , dla których wartości funkcji charakterystycznych są najbliższe zeru. Są to szukane przez nas wielkości strefy wpływu zaburzeń rozkładu obciążeń.

W ten sposób wykonano obliczenie na maszynie cyfrowej Odra 1305 dla kilkunastu wartości λ obliczonych wg. wzoru /4.1.12/.

Na podstawie badań [10, 11, 12] określono wg. [28] moduł sprężystości przekładek taśm T-Pwz i TK-250:

gdzie:
$$E_p = \frac{\Delta G_0}{\Delta \varepsilon}$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

dla T-Pwz $E_p = 2,2 \cdot 10^6 \text{ N/m}$

TK-250 $E_p = 1,35 \cdot 10^6 \text{ N/m}$

Wartości modułu gumy przyjęto wg [26]

$G_1 = 9 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	dla 60°	} twardość w jednostkach Shora
$G_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	50°	
$G_3 = 10^6 \text{ N/m}^2$	65°	

oraz przyjęto kilka grubości gumy międzyprzekładkowej h od $1 \cdot 10^{-3}$ do $3 \cdot 10^{-3}$ m.

Z kombinacji tych wielkości otrzymano szereg wartości λ dla których wykonano serię obliczeń.

Na rys. 4.3.4 przedstawiono zależność długości strefy zaburzeń od wartości λ .

4.4. Wykonanie obliczeń rozkładów obciążeń na poszczególne przekładki.

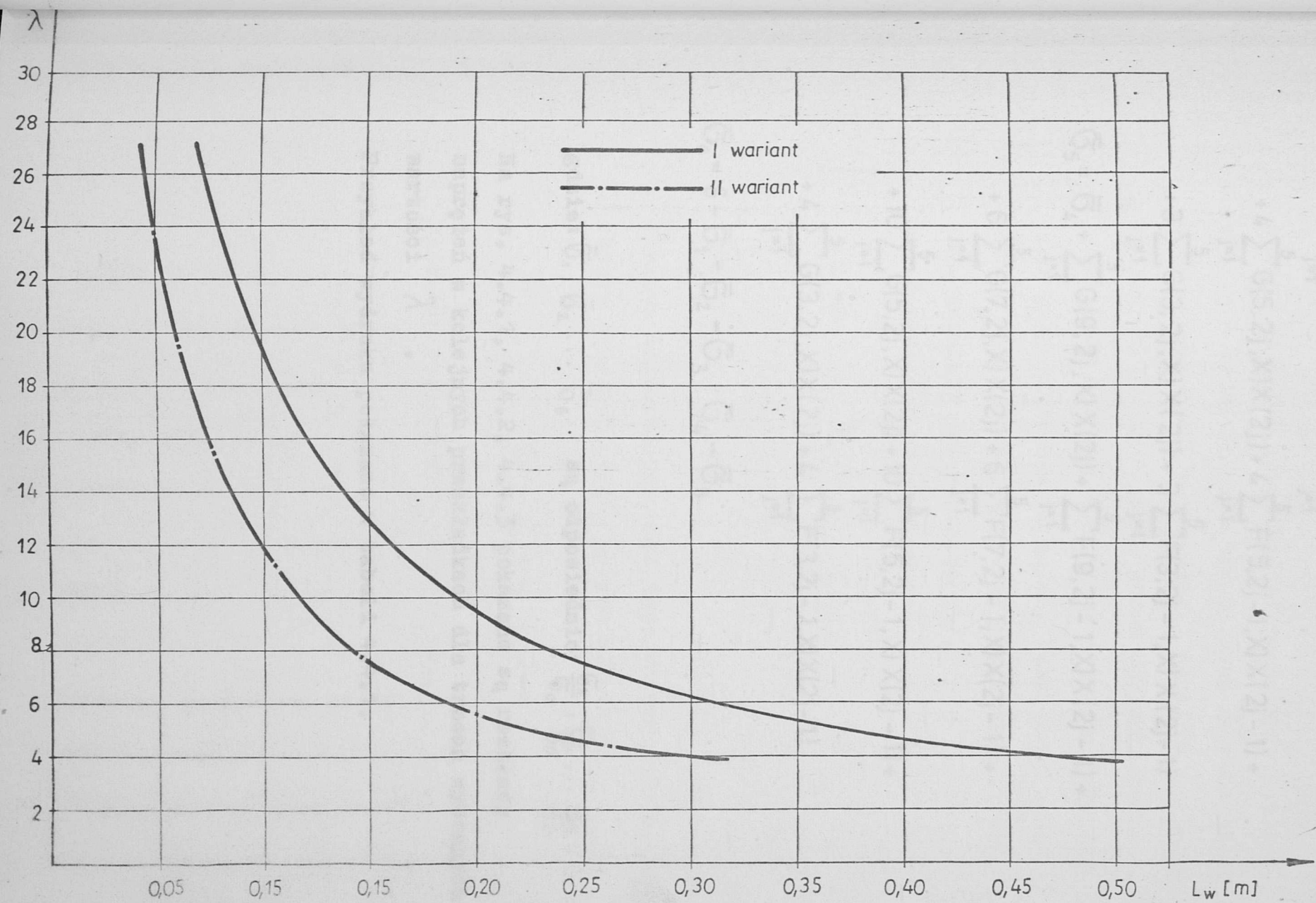
Po określeniu długości strefy zaburzeń przystąpiono do obliczenia rozkładów obciążeń na każdą przekładkę w wyniku przecięcia kolejnych przekładek od punktu $x = 0$ zerwania przekładki do końca strefy zaburzeń co 0,01 m. Obliczenie wykonano dla tych samych wartości λ obliczonych wcześniej.

Stosując przyjęte w /4.3.2/ podstawienie układ równań do obliczenia rozkładu obciążeń dla 1 wariantu można zapisać następująco:

$$\bar{G}_1 = \frac{1}{6} + \sum_{j=1}^5 G(1,2j,X) X(2j) + \sum_{j=1}^5 F(1,2j,X) X(2j-1)$$

$$\bar{G}_2 = 1 + \bar{G}_1 + \sum_{j=1}^5 G(3,2j,X) X(2j) + \sum_{j=1}^5 F(3,2j-1,X) X(2j-1)$$

$$\begin{aligned} \bar{G}_3 = & \bar{G}_2 + \sum_{j=1}^5 G(5,2j,X) X(2j) + \sum_{j=1}^5 F(5,2j-1,X) X(2j) + \\ & + 2 \sum_{j=1}^5 G(3,2j,X) X(2j) + 2 \sum_{j=1}^5 F(3,2j-1,X) X(2j-1) \end{aligned}$$



Rys.4.3.4. Zależność strefy zaburzeń od wartości λ

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_4 = & \bar{\sigma}_3 + \sum_{j=1}^5 G(7, 2j, X) X(2j) + \sum_{j=1}^5 F(7, 2j-1, X) X(2j-1) + \\ & + 4 \sum_{j=1}^5 G(5, 2j, X) X(2j) + 4 \sum_{j=1}^5 F(5, 2j-1, X) X(2j-1) + \\ & + 3 \sum_{j=1}^5 G(3, 2j, X) X(2j) + 3 \sum_{j=1}^5 F(3, 2j-1, X) X(2j-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_5 = & \bar{\sigma}_4 + \sum_{j=1}^5 G(9, 2j, X) X(2j) + \sum_{j=1}^5 F(9, 2j-1, X) X(2j-1) + \\ & + 6 \sum_{j=1}^5 G(7, 2j, X) X(2j) + 6 \sum_{j=1}^5 F(7, 2j-1, X) X(2j-1) + \\ & + 10 \sum_{j=1}^5 G(5, 2j, X) X(2j) + 10 \sum_{j=1}^5 F(5, 2j-1, X) X(2j-1) + \\ & + 4 \sum_{j=1}^5 G(3, 2j, X) X(2j) + 4 \sum_{j=1}^5 F(3, 2j-1, X) X(2j-1) \end{aligned}$$

$$\bar{\sigma}_6 = 6 - \bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_4 - \bar{\sigma}_5$$

gdzie: $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2 \dots \bar{\sigma}_6$ są odpowiednio: $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \frac{\sigma_2}{\sigma_0} \dots \frac{\sigma_6}{\sigma_0}$

Na rys. 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 pokazane są rozkłady naprężeń w kolejnych przekładkach dla trzech wybranych wartości λ .

Przykład wydruku pokazano w tabeli 4.4.1.

Ażeby umożliwić bezpośrednie porównanie wyników obliczeń teoretycznych określonych na podstawie opracowanego modelu z wynikami pomiarów sprawdzających obliczono długość stref wpływu zaburzeń i rozkłady obciążeń dla taśmy z trzema przekładkami jaką stosowano do badań. Rozwiązano układ równań dla trzech przekładek z pierwszą przeciętą /dla warunków jak w badaniach/.

Układ równań miał postać:

$$\begin{cases} \lambda^2 (\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_0) = \sigma_1'' \\ \lambda^2 (\sigma_3 - \sigma_2) = \sigma_1'' + \sigma_2'' \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_0 \end{cases} \quad /4.4.1/$$

funkcja charakterystyczna tego równania do wyznaczenia długości strefy wpływu ma postać:

$$C_2 + C_4 + \frac{1}{3} = \psi$$

Wartości stałych wyznaczono z wzorów:

$$C_1 = \frac{\sin \sqrt{3} \lambda l}{6} \quad /4.4.2/$$

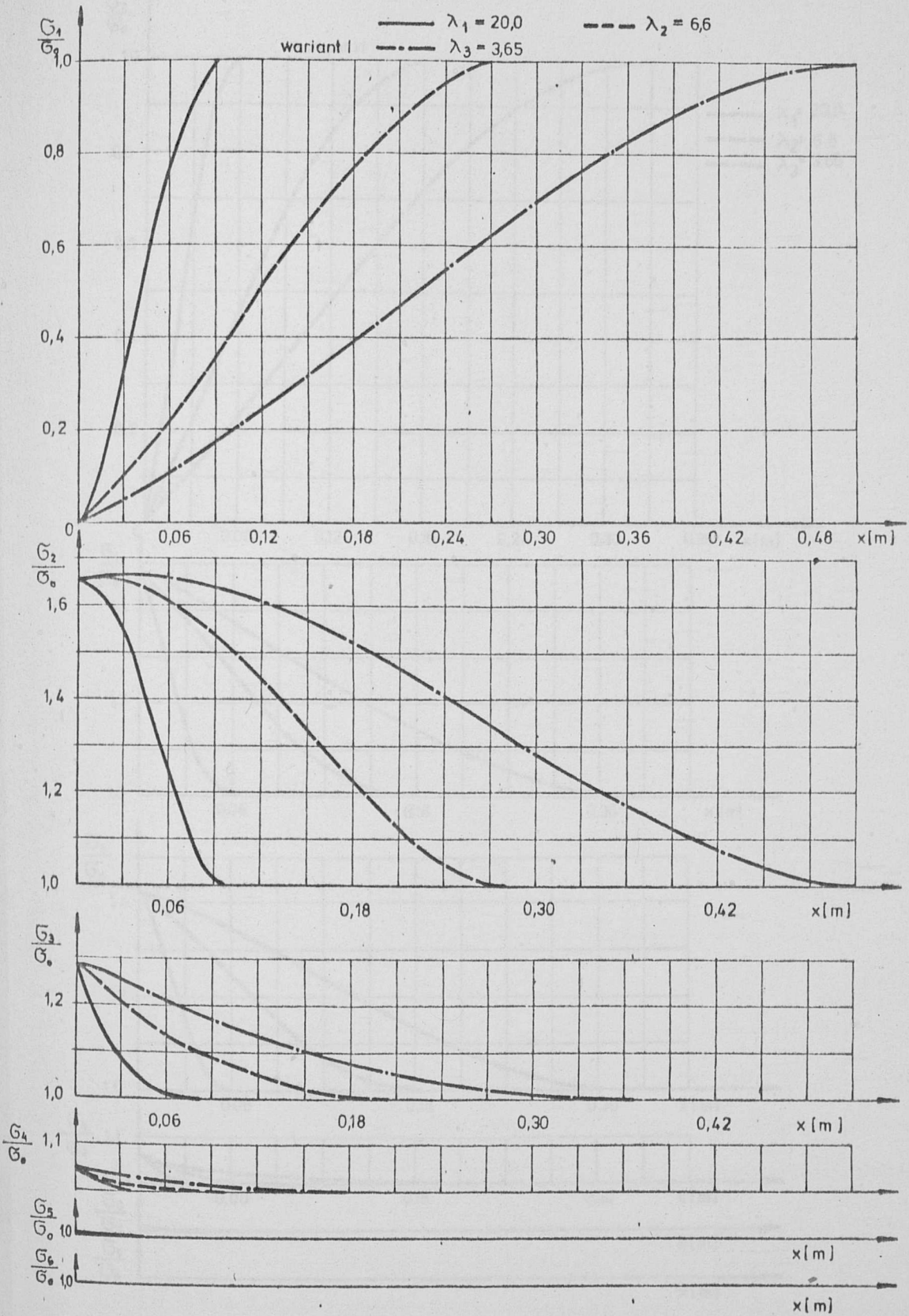
$$C_2 = \frac{\cos \sqrt{3} \lambda l}{6}$$

$$C_3 = \frac{\sin \lambda l}{2}$$

$$C_4 = \frac{\cos \lambda l}{2}$$

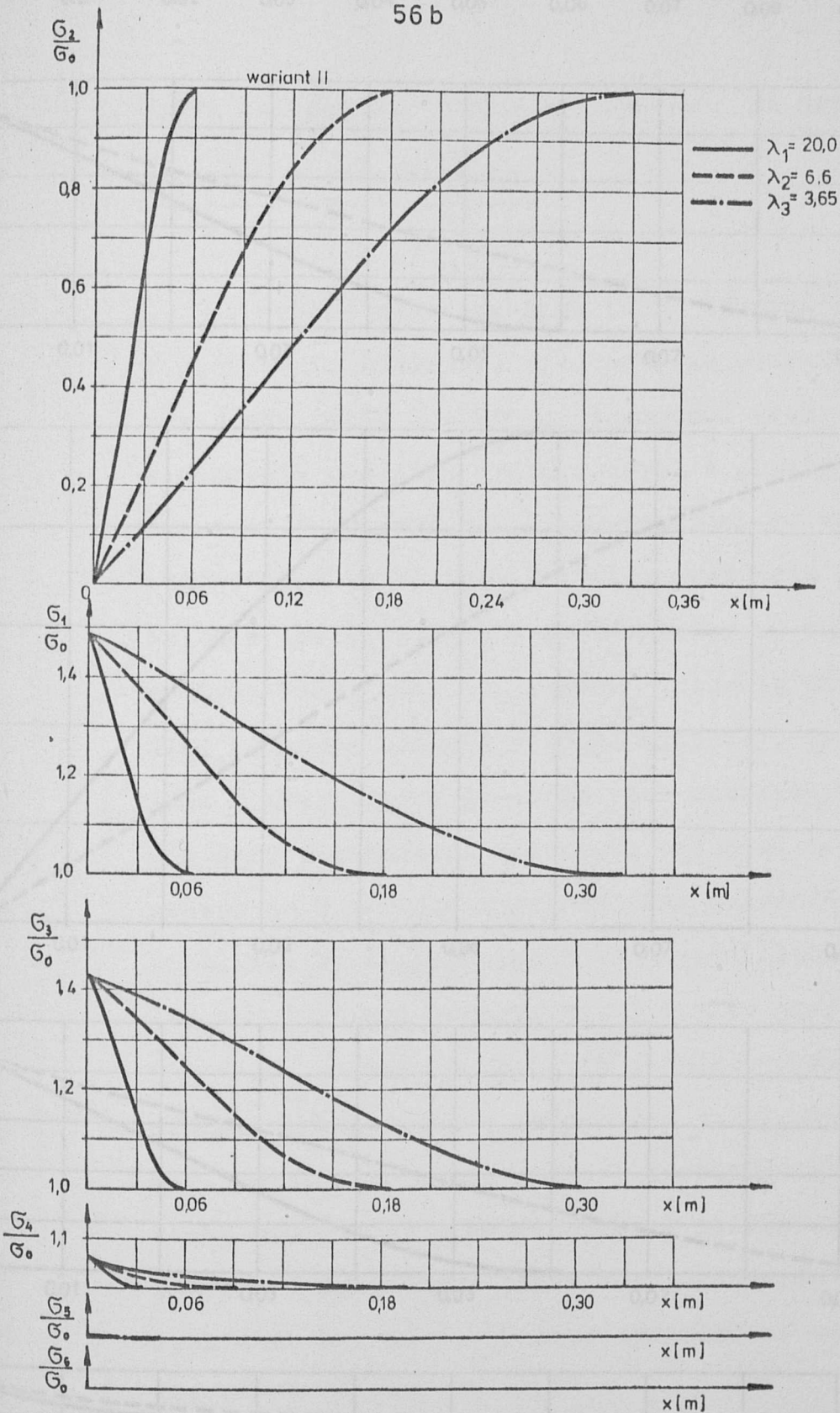
Obliczenia wg. przedstawionych wzorów przeprowadzono w analizie wyników badań.

56a

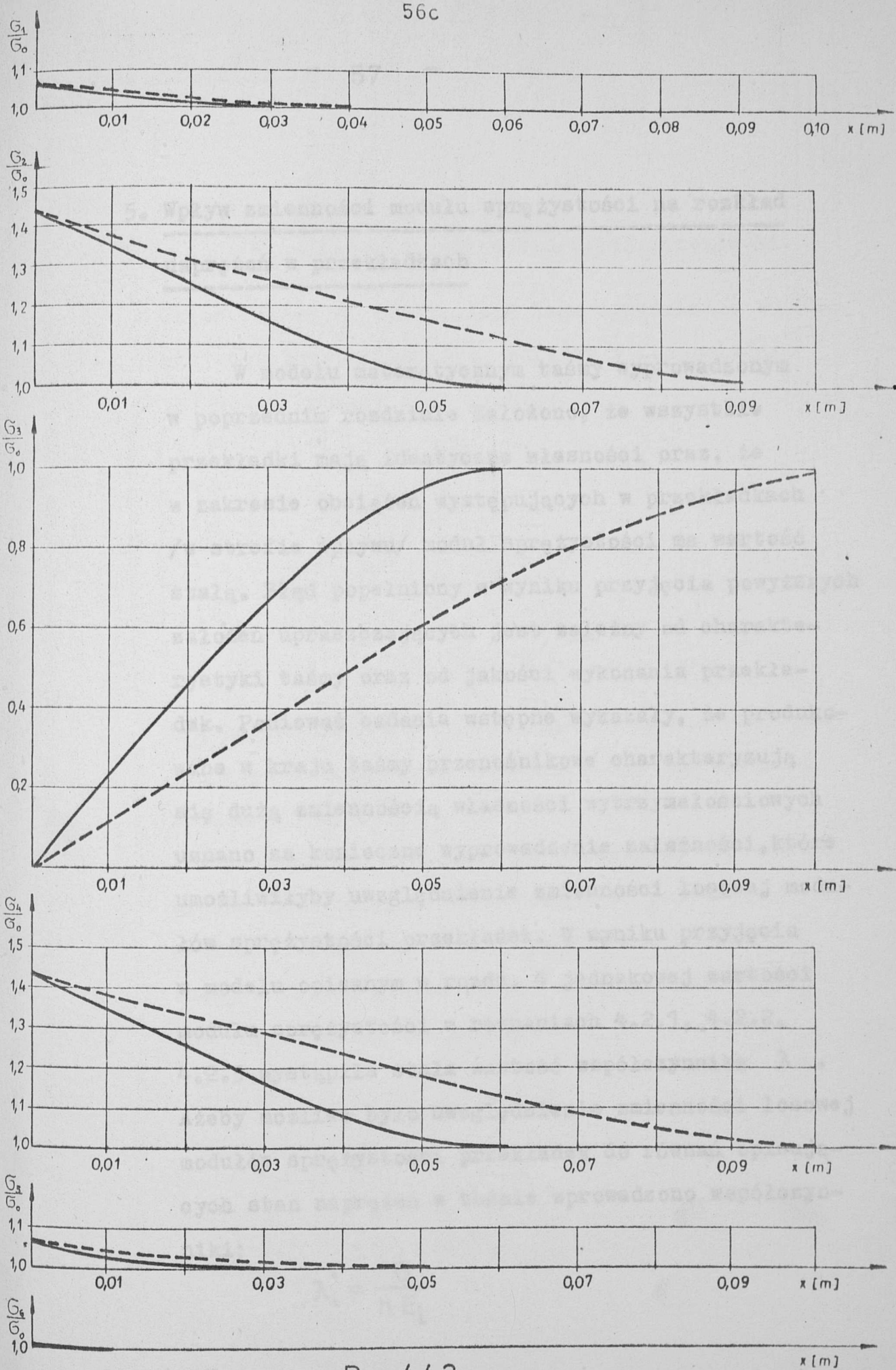


Rys. 44.1. Rozkład naprężeń w poszczególnych przekładkach w wariacie I

56 b



Rys.4.4.2. Rozkład naprężeń w poszczególnych przekładkach w wariancie II



Rys.4.4.3.

Rozkład naprężeń w poszczególnych przekładkach w wariancie III

5. Wpływ zmienności modułu sprężystości na rozkład
naprężeń w przekładkach

W modelu matematycznym taśmy wprowadzonym w poprzednim rozdziale założono, że wszystkie przekładki mają identyczne własności oraz, że w zakresie obciążeń występujących w przekładkach /w strefie wpływu/ moduł sprężystości ma wartość stałą. Błąd popełniony w wyniku przyjęcia powyższych założeń upraszczających jest zależny od charakterystyki taśmy oraz od jakości wykonania przekładek. Ponieważ badania wstępne wykazały, że produkowane w kraju taśmy przenośnikowe charakteryzują się dużą zmiennością własności wytrzymałościowych uznano za konieczne wyprowadzenie zależności, które umożliwiłyby uwzględnienie zmienności losowej modułów sprężystości przekładek. W wyniku przyjęcia w modelu opisanym w rozdz. 4 jednakowej wartości modułu sprężystości w równaniach 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 wystąpiła stała wartość współczynnika λ . Ażeby możliwe było uwzględnienie zmienności losowej modułów sprężystości przekładek do równań opisujących stan naprężeń w taśmie wprowadzono współczynniki:

$$\lambda_i^2 = \frac{G}{h E_i}$$

gdzie:

E_i - moduł sprężystości i -tej przekładki

Układ równań do rozwiązania tego zagadnienia w taśmie sześcioprzekładkowej, wariant 1 /odpowiednio

jak 4.2.1/ będzie miał postać:

$$\begin{cases} \lambda_2^2 \sigma_2 - \lambda_1^2 \sigma_1 - \lambda_0^2 \sigma_0 = \sigma_1'' \\ \lambda_3^2 \sigma_3 - \lambda_2^2 \sigma_2 = \sigma_1'' + \sigma_2'' \\ \lambda_4^2 \sigma_4 - \lambda_3^2 \sigma_3 = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' \\ \lambda_5^2 \sigma_5 - \lambda_4^2 \sigma_4 = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' \\ \lambda_6^2 \sigma_6 - \lambda_5^2 \sigma_5 = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' + \sigma_4'' + \sigma_5'' \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_0 = 6\sigma_0 \end{cases} \quad /5.1/$$

Dla wariantów 2 i 3 układ przedstawia się analogicznie po wstawieniu do 4.2.2 i 4.2.3 odpowiednich wartości λ_i^2 .

Ażeby umożliwić bezpośrednie porównanie wyników pomiarów z wartościami obliczonymi na podstawie wypro-
wadzonych zależności rozwiązano układ równań dla taśmy z trzema przekładkami. Równania opisujące stan naprężeń są następujące:

$$\begin{cases} \lambda_2^2 \sigma_2 - \lambda_1^2 \sigma_1 - \lambda_0^2 \sigma_0 = \sigma_1'' \\ \lambda_3^2 \sigma_3 - \lambda_2^2 \sigma_2 = \sigma_1'' + \sigma_2'' \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_0 \end{cases} \quad /5.2/$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - wartości współczynnika λ_i dla przekładki pierwszej do trzeciej, licząc od przekładki przeciętej.

Drugą pochodną naprężenia σ_2 oblicza się z zależności:

$$\lambda_2^2 \sigma_2 = \sigma_1'' + \lambda_1^2 \sigma_1 + \lambda_0^2 \sigma_0$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\lambda_2^2} (\sigma_1'' + \lambda_1^2 \sigma_1 + \lambda_0^2 \sigma_0) \quad /5.3/$$

$$\sigma_2'' = \frac{1}{\lambda_2^2} \sigma_1'''' + \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \sigma_1''$$

Stąd

$$\sigma_3 = 3\sigma_0 - \sigma_1 - \sigma_2 = 3\sigma_0 - \sigma_1 - \frac{\sigma_1''}{\lambda_2^2} - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \sigma_1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_2^2} \sigma_0 \quad /5.4/$$

Podstawiając równanie /5.3 i 5.4/ do układu równań /5.2/ otrzymujemy:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\lambda_2^2} \sigma_1'''' - \left(\frac{\lambda_3^2 + 2\lambda_2^2 + \lambda_1^2}{\lambda_2^2} \right) \sigma_1'' - \left(\frac{\lambda_3^2 \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 + \lambda_1^2 \lambda_2^2}{\lambda_2^2} \right) \sigma_1 = \\ = \left(\frac{3\lambda_3^2 \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \lambda_0^2 - \lambda_0^2 \lambda_2^2}{\lambda_2^2} \right) \sigma_0 \end{aligned}$$

Podstawiając odpowiednio:

$$b = \lambda_3^2 + 2\lambda_2^2 + \lambda_1^2$$

$$c = \lambda_3^2 \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 + \lambda_1^2 \lambda_2^2$$

$$d = 3\lambda_3^2 \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \lambda_0^2 - \lambda_0^2 \lambda_2^2$$

$$f = \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_0^2 \quad \sigma_1'' = p$$

otrzymujemy równanie charakterystyczne:

$$p^2 + bp + c = 0$$

$$p_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{p} \quad i$$

$$p_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$r_{3,4} = \pm \sqrt{p} \quad i$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - wartości współczynnika λ_i dla przekładki pierwszej do trzeciej, licząc od przekładki przeciętej.

Drugą pochodną naprężenia σ_2 oblicza się z zależności:

$$\lambda_2^2 \sigma_2 = \sigma_1'' + \lambda_1^2 \sigma_1 + \lambda_0^2 \sigma_0$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\lambda_2^2} (\sigma_1'' + \lambda_1^2 \sigma_1 + \lambda_0^2 \sigma_0) \quad /5.3/$$

$$\sigma_2'' = \frac{1}{\lambda_2^2} \sigma_1'''' + \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \sigma_1''$$

Stąd

$$\sigma_3 = 3\sigma_0 - \sigma_1 - \sigma_2 = 3\sigma_0 - \sigma_1 - \frac{\sigma_1''}{\lambda_2^2} - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \sigma_1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_2^2} \sigma_0 \quad /5.4/$$

Podstawiając równanie /5.3 i 5.4/ do układu równań /5.2/ otrzymujemy:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\lambda_2^2} \sigma_1'''' - \left(\frac{\lambda_3^2 + 2\lambda_2^2 + \lambda_1^2}{\lambda_2^2} \right) \sigma_1'' - \left(\frac{\lambda_3^2 \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 + \lambda_1^2 \lambda_2^2}{\lambda_2^2} \right) \sigma_1 = \\ = \left(\frac{3\lambda_3^2 \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \lambda_0^2 - \lambda_0^2 \lambda_2^2}{\lambda_2^2} \right) \sigma_0 \end{aligned}$$

Podstawiając odpowiednio:

$$b = \lambda_3^2 + 2\lambda_2^2 + \lambda_1^2$$

$$c = \lambda_3^2 \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 + \lambda_1^2 \lambda_2^2$$

$$d = 3\lambda_3^2 \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \lambda_0^2 - \lambda_0^2 \lambda_2^2$$

$$f = \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_0^2 \quad \sigma_1'' = p$$

otrzymujemy równanie charakterystyczne:

$$p^2 + bp + c = 0$$

$$p_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{p} \quad i$$

$$p_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$r_{3,4} = \pm \sqrt{p} \quad i$$

Rozwiązaniem równania będzie funkcja harmoniczna

$$\sigma_1 = \frac{d}{C} \sigma_0 + c_1 \sin r_1 x + c_2 \cos r_2 x + c_3 \sin r_3 x + c_4 \cos r_4 x$$

układ równań służący do wyznaczenia stałych zgodnie z warunkami początkowymi jest następujący:

$$\begin{aligned} c_1' \sin r_1 x + c_2' \cos r_1 x + c_3' \sin r_3 x + c_4' \cos r_3 x &= \frac{c-d}{C} \\ r_1 c_1' \cos r_1 x - r_1 c_2' \sin r_1 x + r_3 c_3' \cos r_3 x - r_3 c_4' \sin r_3 x &= 0 \\ -r_1^2 c_1' \sin r_1 x - r_1^2 c_2' \cos r_1 x - r_3^2 c_3' \sin r_3 x - r_3^2 c_4' \cos r_3 x &= f \\ -r_1^3 c_1' \cos r_1 x + r_1^3 c_2' \sin r_1 x - r_3^3 c_3' \cos r_3 x + r_3^3 c_4' \sin r_3 x &= 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Przyjęto przy tym, że dla $x = l_n$ naprężenie $\sigma_1 = \sigma_0$ funkcja charakterystyczna do określenia długości strefy wpływu wyrażona jest wzorem:

$$c_2' + c_4' + \frac{d}{C} = \psi$$

$$c_1', c_2', c_3', c_4' = \frac{C_i}{\sigma_0}$$

wartości stałych wyznaczamy z układu równań /5.5/ stosując kolejne przekształcenie: Wartości stałych wyrażone są wzorami:

przyjmując $r_1 = r_2$ i $r_3 = r_4$

$$c_1' = \left(\frac{f}{r_3^2} + \frac{c-d}{C} \right) \left(\frac{r_3^2}{r_3^2 - r_1^2} \right) \sin r_1 x$$

$$c_2' = \left(\frac{f}{r_3^2} + \frac{c-d}{C} \right) \left(\frac{r_3^2}{r_3^2 - r_1^2} \right) \cos r_1 x$$

$$c_3' = \left(\frac{f}{r_1^2} + \frac{c-d}{C} \right) \left(\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_3^2} \right) \sin r_3 x$$

/5.6/

$$c_4' = \left(\frac{f}{r_1^2} + \frac{c-d}{c} \right) \left(\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_3^2} \right) \cos r_3 x \quad (5.7)$$

Tak wyznaczone wartości stałych podstawia się do układu równań /5.5/ a następnie z układu równań /5.2/ oblicza się rozkład naprężeń w przekładkach w strefie wpływu zaburzeń.

Dla uzyskania danych do bezpośredniego wykorzystania w analizie wyników badań do pomiarów modułów sprężystości pobrano próbki z tej samej taśmy 5 TK-250, którą używano do badań laboratoryjnych rozkładu naprężeń. Pomiaru własności każdej przekładki wykonano na próbkach wyciętych z przekładek po rozwarstwieniu taśmy. Ponieważ rozkład naprężeń w badanych próbkach określono przy siłach rozciągających przedstawiających z prędkością powstania górnego uchybu krytyczną 100 km/min wydłużenie przekładek pomierzono w identycznych warunkach jak w pomiarach rozkładu naprężeń. Określenie na tej podstawie moduły podstawiono do równań umożliwiając uzyskanie wartości obliczonych w pełni porównywalnych z pomierzonymi.

Wyniki wykonanych pomiarów wydłużenia przy 10 % i 20 % naprężenia kryjącego przedstawiono w tabeli 6.7.

6. Zmienność modułu sprężystości przekładek badanych taśm.

Dla uzyskania danych do bezpośredniego wykorzystania w analizie wyników badań do pomiarów modułów sprężystości pobrano próbki z tej samej taśmy 3 TK-250, którą używano do badań laboratoryjnych rozkładu naprężeń. Pomiaru własności każdej przekładki wykonywano na próbkach wyciętych z przekładek po rozwarstwieniu taśmy. Ponieważ rozkład naprężeń w badanych próbkach określono przy siłach rozciągających przyrastających z prędkością posuwu górnego uchwytu zrywar-ki 100 mm/min wydłużenie przekładek pomierzono w identycznych warunkach jak w pomiarach rozkładu naprężeń. Określenie na tej podstawie moduły podstawione do równań umożliwią uzyskanie wartości obliczonych w pełni porównywalnych z pomierzonymi.

Wyniki wykonanych pomiarów wydłużeń przy 10 % i 20 % naprężenia zrywającego przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.2.

Obliczone z tych pomiarów wartości modułów sprężystości przedstawia tabela 6.2. Dla łatwiejszej interpretacji pomiarów w tabeli 6.3 przedstawiono wartości parametrów zmienności wyników otrzymanych z badań.

Tabela 6.1.

Wydłużenie przekładek

Nr próbki	obciążenie	
	10 % R_T	20 % R_T
1	4,5	10,0
2	4,7	10,0
3	5,2	12,0
4	5,7	13,0
5	6,0	11,0
6	6,1	12,0
7	5,5	11,0
8	5,2	11,0
9	6,1	13,0
10	6,2	12,0
11	5,3	10,0
12	5,0	11,0

Parametry zmienności	Obciążenie	
	10 % R_T	20 % R_T
wartość średnia S_p /B/m/	4,63 · 10 ⁵	4,32 · 10 ⁵
Wariancja s^2	0,2461	0,2977
współczynnik zmienności $cv = \frac{s}{\bar{x}}$	0,1058	0,1262

Tabela 6.2.

Wartość modułów sprężystości przekładek E_p [N/m]

Nr próbki	obciążenie	
	10 % R_T	20 % R_T
1	5,56 · 10 ⁵	4,54 · 10 ⁵
2	5,32 · 10 ⁵	4,72 · 10 ⁵
3	4,81 · 10 ⁵	3,67 · 10 ⁵
4	4,38 · 10 ⁵	3,42 · 10 ⁵
5	4,17 · 10 ⁵	5,0 · 10 ⁵
6	4,10 · 10 ⁵	4,23 · 10 ⁵
7	4,55 · 10 ⁵	4,54 · 10 ⁵
8	4,81 · 10 ⁵	4,31 · 10 ⁵
9	4,10 · 10 ⁵	3,62 · 10 ⁵
10	4,03 · 10 ⁵	4,31 · 10 ⁵
11	4,72 · 10 ⁵	5,32 · 10 ⁵
12	5,0 · 10 ⁵	4,16 · 10 ⁵

Tabela 6.3.

Parametry zmienności modułów sprężystości przekładek

Parametry zmienności	Obciążenie	
	10 % R_T	20 % R_T
wartość średnia E_p /N/m/	4,63 · 10 ⁵	4,32 · 10 ⁵
Wariancja s^2	0,2461	0,2977
współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{E_p}$	0,1058	0,1262

7. Sprawdzając badania laboratoryjne

Analizując przedstawione pomiary można stwierdzić, że pojedyncze przekładki wykazują znaczną zmienność wartości modułu sprężystości pod działaniem tego samego obciążenia. Zmienności te wahają się w granicach 10,58 % dla 10 % R_r do 12,6 % R_r i są na tyle duże, że konieczne jest ich uwzględnienie w analizie wyników pomiarów.

Jedną z przyczyn występujących w badaniach próbkach pod działaniem siły rozciągającej. Uzyskane wyniki podlegały do oseny błędowi popełnionego przy obliczeniu tego rozkładu na drodze teoretycznej w wyniku przyjętych uproszczeń, a tym samym przydatności przyjętego modelu w zastosowaniach inżynierskich np. jako podstawy doboru taśm przenośnikowych.

W badaniach określono:

- wpływ parametrów geometrycznych i sprężystych taśmy na długość strefy zaburzeń,
- rozkład naprężeń w przekładkach w wyniku przecięcia jednej z nich.

7.2. Metoda badań

Rozkład naprężeń w przekładkach taśmy określono przez wyłączenie względne przekładek.

7. Sprawdzające badania laboratoryjne

7.1. Cel badań laboratoryjnych.

Celem badań laboratoryjnych było ustalenie rozkładów obciążeń na przekładki w strefie zaburzeń wywołanej przecięciem jednej z nich, występujących w badanych próbkach pod działaniem siły rozciągającej. Uzyskane wyniki posłużyły do oceny błędu popełnionego przy obliczaniu tego rozkładu na drodze teoretycznej w wyniku przyjętych uproszczeń, a tym samym przydatności przyjętego modelu w zastosowaniach inżynierskich np. jako podstawy doboru taśm przenośnikowych.

W badaniach określono:

- wpływ parametrów geometrycznych i sprężystych taśmy na długość strefy zaburzeń,
- rozkład naprężeń w przekładkach w wyniku przecięcia jednej z nich.

7.2. Metoda badań

Rozkład naprężeń w przekładkach taśmy określono mierząc wydłużenia względne przekładek.

Bezpośrednie pomiary wydłużeń w przekładkach wewnętrznych przy zastosowaniu tensometrów stosowanych zazwyczaj do tego celu wymagają odsłonięcia pewnej powierzchni przekładki a tym samym uszkodzenia struktury taśmy. Uszkodzenie to wpływa na wielkość naprężeń w badanej przekładce. Na skutek tego pomierzone wielkości byłyby obarczone znacznym błędem. Wobec tego opracowano metodę badań umożliwiającą pomiar wydłużeń względnych dwóch przekładek zewnętrznych. Ponieważ na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej stwierdzono, że przypadek najbardziej niekorzystny występuje przy przecięciu przekładki zewnętrznej dlatego pomiary przeprowadzono dla tego wariantu. Tym samym otrzymane wyniki są wystarczające dla osiągnięcia postawionego celu pomimo, że zastosowana metoda nie umożliwia pomiaru wydłużeń względnych przekładek wewnętrznych w taśmach o liczbie przekładek większej od trzech.

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych /rozd. 3/ określono zmienności wytrzymałości próbek wycinanych z całej szerokości taśmy dla różnych typów krajowych taśm przenośnikowych. Analizując wyniki badań stwierdzono, że największą stałość parametrów wytrzymałościowych wykazuje taśma TK-250 dlatego ten typ taśmy wybrano do badań sprawdzających.

Użyto taśmy trójprzekładkowej, dla której dzięki przyjętej metodzie można określić obciążenie we wszystkich przekładkach.

Pod wpływem przyłożonego do próbki obciążenia zmieniającego się w przyjętych^w pomiarach granicach w pobliżu przekroju z uszkodzoną przekładką przyrosty naprężeń są inne w każdej przekładce. W wyniku tego przekładki przemieszczają się względem siebie co wykorzystano do pomiaru różnic przyrostów wydłużeń występujących w sąsiednich przekładkach. W leżące obok siebie przekładki wbite szpilki. W wyniku przemieszczeń przekładek szpilki wychylają się z położenia początkowego, co pozwala na pomiar różnicy wydłużeń przekładek. Kąty wychyleń szpilek określono metodą pośrednią mierząc odległości między szpilekami w punktach wbicia w taśmę /dolne odcinki/ i między ich zewnętrznymi końcami /górne odcinki/. Pomiar wykonywano suwmiarką z dokładnością do 0,1 mm.

7.3. Próbkę do badań.

Próbki pobrano z taśmy zgodnie z metodą podaną w rozdziale 7.2. Na podstawie otrzymanej zmienności parametrów wytrzymałościowych [12] obliczono liczbę próbek reprezentatywną dla badań sprawdzających.

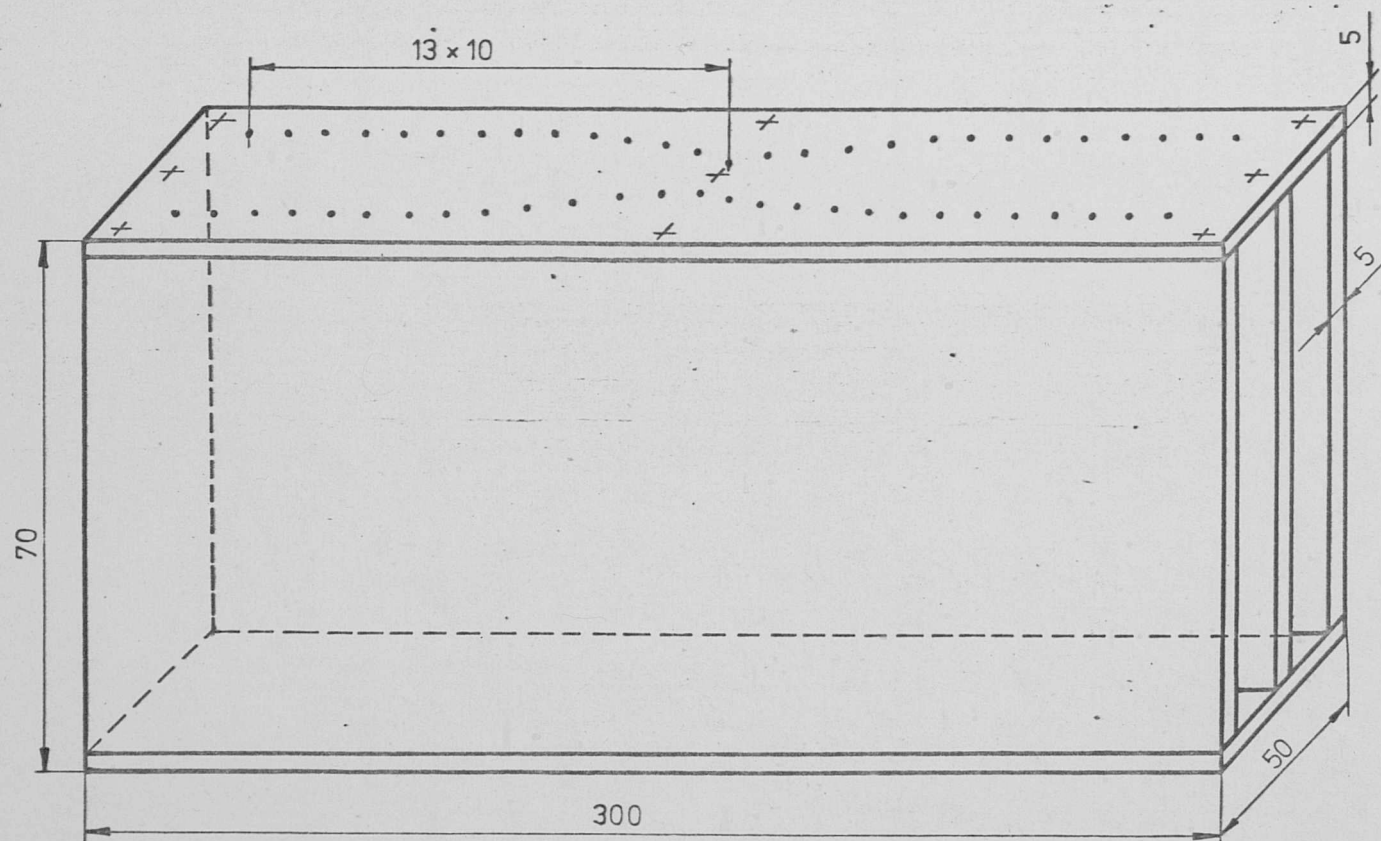
Wynosi ona 5 próbek. Ponieważ celem badań było między innymi również określenie wpływu parametrów geometrycznych taśm, a więc i grubości frykcji na rozkład obciążeń, a przemysł nie produkuje jednego typu taśmy o różnych grubościach frykcji, konieczne było specjalne wykonanie próbek z przekładek z taśmy TK250 z warstwą międzyprzekładkową różnej grubości. Próbki wulkanizowano z rozwarstwionych przekładek taśmy TK-250 stosując trzy różne grubości warstwy międzyprzekładkowej wykonanej z tej samej mieszanki gumowej.

W ten sposób wykonano trzy serie po 5 próbek każda o różnych parametrach geometrycznych. Parametry badanych taśm podano w tabeli 7.3.1.

Wymiary próbek dostosowane były do wymiarów posiadanej zrywarki. Zastosowano próbki o szerokości 55 mm /szerokość szczęk zrywarki 60 mm/ i długości 600 mm.

Przygotowanie próbki do badań odbywało się następująco.

W wyciętą próbkę o wymiarach 55 x 600 mm wbijano 56 szpilek o długości $73 \pm 0,01$ mm wykonanych z dokładnością 0,01 mm o długości ostrza stożka 2 mm. Szpilki wbijano za pomocą specjalnie zaprojektowanego i wykonanego szablonu zapewniającego równoległość położenia igieł i jednakową głębokość wbicia szpilek w rdzeń taśmy /do drugiej przekładki/.



Rys.7.3.1 Schemat szablonu do wbijania szpilek w próbkę.

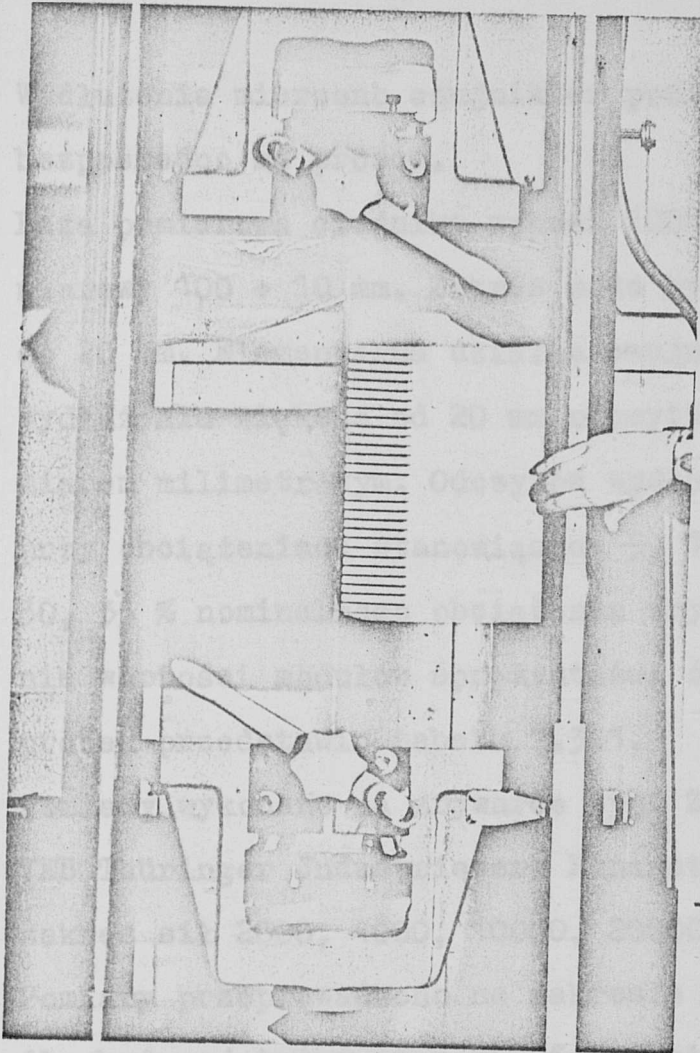
Tabela 7.3.1.

Własności badanych próbek

Nr serii	Ilość przekładek	Grubość rdzenia	Liczba nici osnowy na 100 mm	Liczba nici wątki na 100 mm	Sredni moduł sprężystości
-	-	mm	-	-	N/m
1	3	4,3	26	24	$5,92 \cdot 10^5$
2	3	8,0	26	24	$6,12 \cdot 10^5$
3	3	8,9	26	24	$7,20 \cdot 10^5$

Schemat szablonu do wbijania szpilek przedstawia rys. 7.3.1.

Po wbiciu szpilek w taśmę szablon podnoszono na wysokość 20 mm, taśmę smarowano klejem OKT-11 aby szpilki nie miały możliwości wysuwania się z próbek i pozostawiono w szablonie na okres 12 godz. Po tym czasie zdejmowano szablon wyjmowano dwie środkowe szpilki i w miejscu ich śladu przecinano jedną zewnętrzną przekładkę. Przygotowaną próbkę do badań założoną w szczękach zrywarki przedstawia zdjęcie 7.3.1.



Zdjęcie 7.3.1. Przygotowana próbka do badań.

7.4. Wykonanie pomiarów

Przed przystąpieniem do badań sprawdzających dla każdej próbki przeprowadzono pomiary wydłużeń w celu określenia modułów sprężystości przekładek.

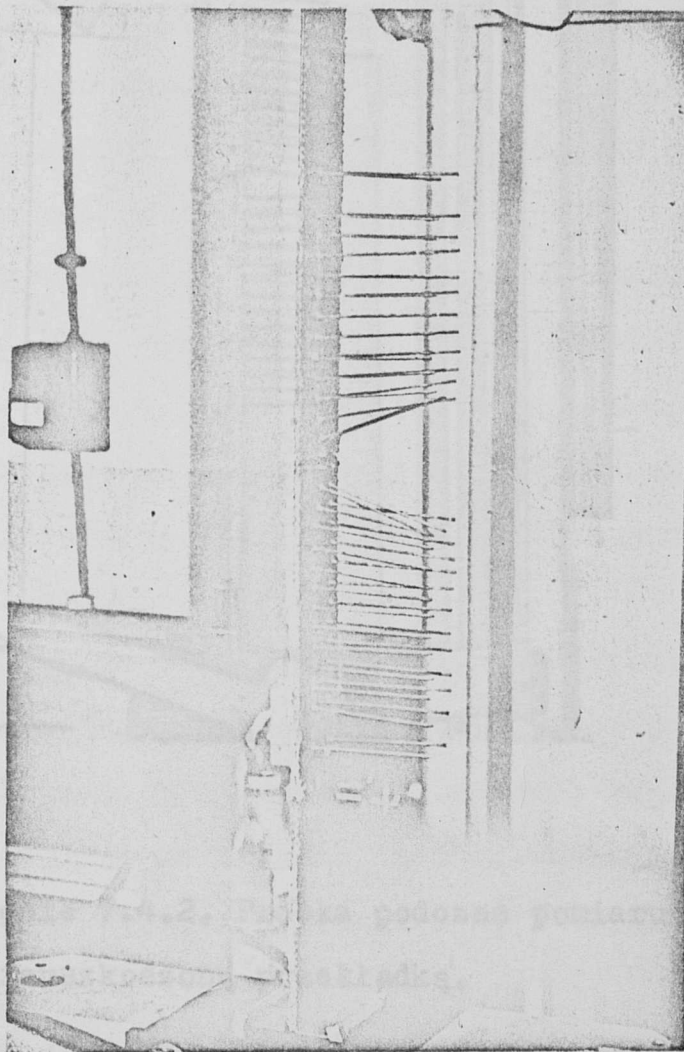
Wydłużenia mierzone czujnikiem pomiarowym mocowanym bezpośrednio na próbce.

Baza pomiarowa czujnika wynosi 100 mm, a zakres pomiarowy 100 + 10 mm. Zakres może być zwiększony do 20 mm. Elementarna działka czujnika wynosi 0,01 mm. Wydłużenia większe od 20 mm odczytywano zwykłym przymiarem milimetrowym. Odczytów wydłużeń dokonywano przy obciążeniach stanowiących 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 % nominalnego obciążenia zrywającego. Zestawienie wartości modułów sprężystości dla trzech serii próbek przedstawia tabela 7.3.1.

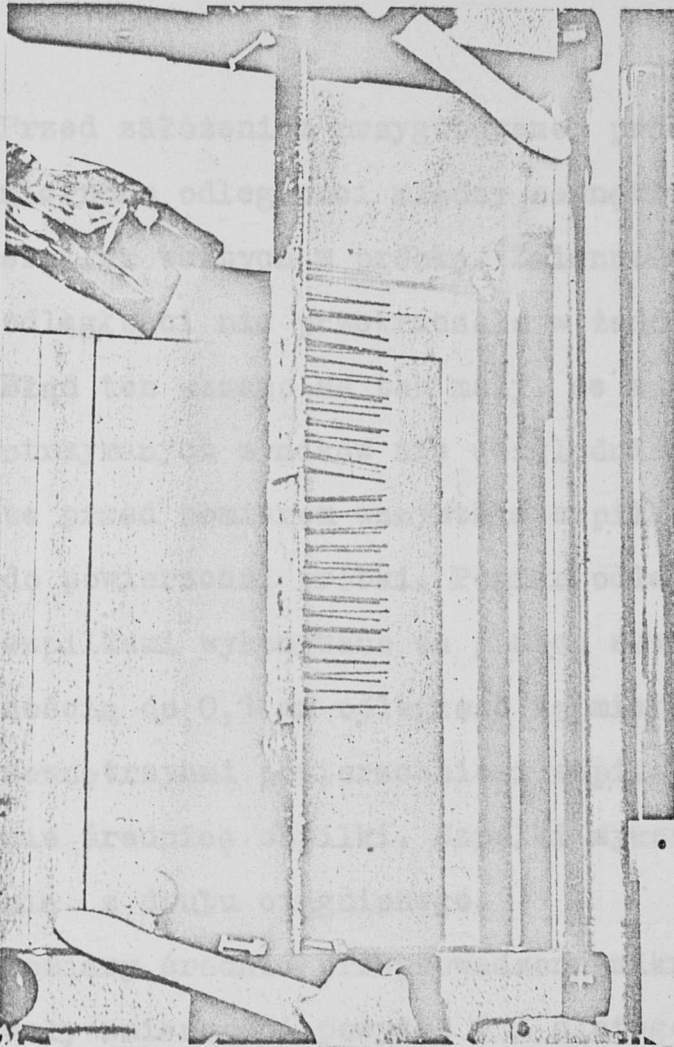
Pomiary wykonano na zrywance typu ZD-10/90 firmy VEB Thüringer Industriewerk Ranenstein posiadającej zakres sił 2000, 4000, 10000, 20000, 40000, 100000 N. Pomiary przeprowadzono na zakresie do 9810 N, co dla badanej taśmy stanowi 25 % obciążenia zrywającego. Jest to zakres obciążeń, przy którym taśma pracuje na przenośniku. Elementarna działka zrywarki przy tym zakresie wynosi 49,05 N.

Po założeniu w szczęki zrywarki próbkę rozciągano siłą 4905, 7357,5, 9810 N. Przy każdej wartości siły mierzy się kąty wychyleń szpilek po stronie z przeciętą przekładką i po przeciwnej.

Zdjęcia 7.4.1. i 7.4.2. przedstawiają próbki w czasie badania strona z przecięciem i bez przecięcia.



Zdjęcie 7.4.1. Próbka podczas pomiaru strona z przeciętą przekładką.



Zdjęcie 7.4.2. Próbką podczas pomiaru strona z nieuszkodzoną przekładką.

7.5. Analiza błędów

Dokładność otrzymanych wyników badań uzależniona jest od dokładności przygotowania próbek do badań i dokładności wykonania samego pomiaru.

Przed założeniem przygotowanej próbki na zrywarkę mierzono odległości między zewnętrznymi końcami szpilek wbitych w próbkę. Zmienność otrzymanych odległości nie przekraczała w żadnym przypadku 1%. Błąd ten uznano za tak mały, że w dalszej analizie otrzymanych wyników nie uwzględniono go przyjmując, że przed pomiarem wszystkie szpilki były prostopadłe do powierzchni próbki. Pomiar odległości między szpilkami wykonywano za pomocą suwmiarki z dokładnością do 0,1 mm odległość tą mierzono między zewnętrznymi powierzchniami szpilek odejmując następnie średnicę szpilki. Szpilki wykonane były fabrycznie z drutu ciągnionego.

Pomiary średnic przeprowadzone mikrometrem nie wykazywały zmienności powyżej 1 % dlatego przyjęto, że dokładność wykonania szpilek jest tak wysoka, że nie wpływa na dokładność mierzonych odległości. Długość szpilek wykonana była z dokładnością do 0,01 mm.

Wartości sił przy których prowadzone były pomiary odczytywano z dokładnością jednej działki zrywarki przy zakresie pomiaru wynosiła ona 49,05 N.

Przeprowadzony pomiar modułu sprężystości obarczony był błędem wynikającym z pomiaru sił i wydłużeń oraz parametrów geometrycznych taśm.

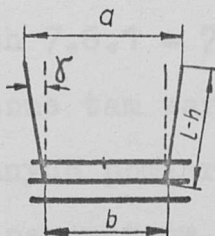
Błąd bezwzględny pomiaru modułu sprężystości obliczony z różniczki zupełnej wyniósł $E_p = \pm 5 \cdot 10^4$ N/m.

Błąd względny pomiaru sprężystości waha się w granicach 8 - 10 % wartości w zależności od obciążenia.

7.6. Wyniki pomiarów.

Na podstawie pomierzonych odległości między szpilkami w następujący sposób obliczono wartości kątów.

Schemat pomiaru kątów przedstawia rys. 7.6.1.



Rys. 7.6.1. Schemat obliczania kątów.

$$\frac{a - b}{2} : l - h = \text{arc sin } \gamma \quad /7.6.1/$$

gdzie:

- h - głębokość wbicia szpilki zależna od grubości taśmy /mm/
- l - długość szpilki /mm/
- a - odległość między szpilkami w górnych punktach /mm/
- b - odległość między szpilkami w dolnych punktach /mm/

Kąt określony w ten sposób jest już średnią z dwóch kątów wychyleń szpilek wbijanych w jednakowej odległości od miejsca przecięcia lub środka próbki /przekładka 3/.

Ponieważ w dalszych analizach tak obliczamy wartości średnie kątów i one są podstawą do analizy wyników ujęcie to nie wpływa na dalsze obliczenia.

Pomierzone wielkości i obliczone w ten sposób kąty, dla wszystkich badanych serii prób przedstawiono w tabelach 7.6.1 - 7.6.9.

Zamieszczone tam wartości są wielkościami średnimi z otrzymanych pomiarów. Jednocześnie zamieszczono wartości parametrów, które przyjęto jako miarodajne dla oceny zmienności otrzymanych wyników: wariancja s^2 oraz współczynnik zmienności α obliczonych wg.

[31] .

Wyniki pomiarów. Seria 1, siła rozciągająca 4905 N

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. pod czas pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. pod czas pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	13,30	27,74	6,94	0,095	20	10	11,27	7,39	0,432	0,089
20	20	24,05	23,12	6,70	0,112	20	20	22,67	6,42	0,132	0,088
20	30	34,24	18,15	3,84	0,108	20	30	33,00	7,19	0,437	0,092
20	40	46,20	9,77	0,825	0,093	20	40	44,23	7,17	0,534	0,102
20	50	56,13	7,99	1,11	0,132	20	50	54,96	4,68	0,210	0,098
20	60	66,87	3,63	0,2121	0,127	20	60	65,72	1,65	0,047	0,132
20	70	78,18	2,50	0,082	0,115	20	70	76,46	1,96	0,078	0,143
20	80	88,37	0,35	0,68 · 10 ⁻³	0,148	20	80	87,15	0,77	1,75 · 10 ⁻⁴	0,172

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Waria-ncja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Waria-ncja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	13,87	29,65	7,280	0,091	20	10	11,67	7,80	0,549	0,095
20	20	24,3	25,42	4,344	0,082	20	20	22,48	8,20	0,784	0,108
18	30	35,11	21,15	4,296	0,098	20	30	35,14	8,15	0,0127	0,113
20	40	46,75	16,37	3,421	0,113	20	40	43,84	7,10	0,813	0,127
20	50	57,55	12,17	2,277	0,124	20	50	56,61	6,32	0,839	0,145
20	60	68,08	9,80	1,936	0,142	20	60	66,94	4,61	0,010	0,164
20	70	79,93	5,20	0,315	0,108	20	70	77,25	2,15	0,136	0,172
20	80	92,07	1,00	0,0187	0,137	20	80	92,25	0,79	0,011	0,134

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od usz-dzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	14,73	32,24	7,509	0,085	20	10	12,4	7,94	0,655	0,102
20	20	24,93	31,15	6,684	0,083	20	20	23,03	8,52	0,697	0,098
18	30	36,11	27,72	7,229	0,097	20	30	33,97	9,19	0,639	0,087
20	40	47,51	22,14	4,804	0,099	20	40	45,78	8,31	1,079	0,125
20	50	57,96	18,71	3,362	0,098	20	50	57,68	6,52	0,740	0,132
20	60	70,17	16,10	2,696	0,102	20	60	68,67	6,13	0,705	0,137
20	70	81,8	6,30	0,506	0,113	20	70	80,50	5,80	0,243	0,085
20	80	92,75	2,18	0,074	0,125	20	80	89,62	3,10	0,147	0,124
20	90	104,34	0,32	1,5 · 10 ⁻³	0,122	20	90	104,50	1,18	0,026	0,137

Wyniki pomiarów. Seria 2, siła rozciągająca 4905 N

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	14,63	31,84	3,896	0,062	20	10	10,87	4,71	0,187	0,092
20	20	25,12	23,75	1,644	0,054	20	20	22,00	6,12	0,258	0,083
20	30	35,00	19,80	2,385	0,078	20	30	32,75	5,91	0,176	0,071
20	40	45,50	14,44	1,506	0,085	20	40	43,87	5,82	0,227	0,082
20	50	56,25	10,40	0,915	0,092	20	50	54,75	5,64	0,240	0,087
20	60	66,83	8,04	0,535	0,091	18	60	65,75	4,92	0,227	0,097
20	70	77,5	5,13	0,190	0,085	20	70	76,75	3,93	0,176	0,107
20	80	87,87	3,87	0,146	0,099	20	80	87,38	2,53	0,061	0,098
20	90	99,00	2,80	0,073	0,097	20	90	98,25	1,77	0,022	0,084
20	100	109,25	1,04	0,011	0,102	20	100	108,75	0,59	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,125
20	110	119,50	0,05	$4,3 \cdot 10^5$	0,132	20	110	119,25	0,15	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0,149

Wyniki pomiarów. Seria 2, siła rozciągająca 7357,5 N

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Wariancja	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	16,12	39,54	0,977	0,025	20	10	11,62	5,97	0,195	0,074
20	20	26,62	30,01	$1,37 \cdot 10^{-3}$	0,037	20	20	22,00	7,24	0,208	0,063
20	30	36,87	24,93	0,636	0,032	20	30	33,75	7,32	0,247	0,068
20	40	47,63	20,92	1,050	0,049	20	40	45,00	7,38	0,282	0,072
20	50	58,25	16,74	0,404	0,038	20	50	56,37	6,98	0,319	0,081
20	60	68,87	11,85	0,668	0,069	18	60	66,38	6,26	0,136	0,059
20	70	79,85	10,04	0,667	0,082	20	70	78,75	6,10	0,263	0,084
20	80	90,87	7,89	0,126	0,045	20	80	90,00	5,76	0,274	0,091
20	90	101,62	7,17	0,304	0,077	20	90	101,00	3,22	0,0749	0,085
20	100	112,00	3,92	0,061	0,063	20	100	111,83	2,64	0,079	0,107
20	110	122,87	2,81	0,065	0,091	20	110	122,5	1,96	0,0499	0,114
20	120	134,25	0,35	$6,7 \cdot 10^{-4}$	0,074	20	120	134,00	0,78	$6,8 \cdot 10^{-3}$	0,106

Wyniki pomiarów. Seria 2, siła rozciągająca 9810 N

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodzenia podciosa pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodzenia podciosa pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
--	mm	mm	°	/N/m ²	--	--	mm	mm	°	/N/m ²	--
20	10	18,00	44,96	0,808	0,020	20	10	11,31	6,51	0,213	0,071
20	20	29,00	37,30	1,337	0,031	20	20	22,37	8,46	0,541	0,087
20	30	39,15	31,98	0,091	0,026	20	30	33,63	7,96	0,251	0,063
20	40	50,50	26,72	1,607	0,047	20	40	45,25	9,46	0,463	0,072
20	50	61,62	21,38	0,695	0,039	20	50	56,75	9,13	0,520	0,079
20	60	71,63	16,28	1,612	0,078	18	60	67,63	7,89	0,417	0,082
20	70	83,37	14,21	0,588	0,054	20	70	79,00	7,24	0,335	0,080
20	80	94,50	11,97	1,212	0,092	20	80	90,25	6,75	0,256	0,075
20	90	105,25	10,03	0,660	0,081	20	90	101,50	4,35	0,153	0,090
20	100	116,75	6,83	0,248	0,073	20	100	112,5	2,73	0,129	0,132
20	110	127,62	3,93	0,108	0,084	20	110	123,62	2,74	0,067	0,095
20	120	137,37	0,65	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,088	20	120	136,00	1,23	0,017	0,107

Wyniki pomiarów, seria 3, siła rozciągająca 4905 N

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Srednia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	15,62	30,30	1,543	0,041	20	10	11,12	3,85		0,081
20	20	25,87	25,74	0,811	0,035	20	20	22,25	4,55		0,073
20	30	36,25	23,39	1,208	0,047	20	30	33,00	4,61		0,075
20	40	47,00	18,12	0,887	0,052	20	40	44,12	6,86		0,084
20	50	57,75	13,52	0,921	0,071	20	50	55,00	6,00		0,085
20	60	67,75	10,54	0,528	0,069	20	60	66,12	6,03		0,052
20	70	78,25	7,78	0,211	0,059	20	70	78,75	6,91		0,066
20	80	88,50	6,38	0,280	0,083	20	80	87,87	5,24		0,098
20	90	99,37	4,01	0,148	0,096	20	90	99,12	4,6		0,092
20	100	110,00	3,36	0,058	0,072	20	100	109,87	5,06		0,113
20	110	120,87	2,26	0,033	0,081	20	110	120,62	3,22		0,132
20	120	131,62	1,01	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,079	20	120	131,75	2,97		0,107
	130						130				
20	140	153,37	-0,37	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,098	20	140	153,37	2,91		0,123

Wyniki pomiarów, seria 3, siła rozciągająca 7357,5 N

Przekładka pierwsza z przecięciem						Przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodzenia przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podczas pomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	17,37	37,00	5,262	0,062	18	10	4,58	11,5	0,137	0,081
18	20	28,25	31,36	4,414	0,067	20	20	5,30	22,75	0,115	0,064
20	30	38,63	29,68	2,568	0,054	20	30	6,43	33,66	0,214	0,072
20	40	49,25	25,81	1,534	0,048	20	40	8,27	45,00	0,725	0,109
20	50	59,50	19,79	2,441	0,079	18	50	8,01	56,50	0,187	0,054
20	60	70,87	16,68	1,607	0,076	20	60	7,72	66,87	0,187	0,123
20	70	81,62	14,45	1,403	0,082	20	70	7,85	79,00	0,136	0,047
20	80	92,62	11,76	0,697	0,071	20	80	6,93	90,25	0,461	0,098
18	90	102,25	8,89	0,668	0,092	20	90	6,99	101,16	0,422	0,093
20	100	113,75	6,85	0,423	0,095	20	100	5,76	112,50	0,578	0,132
20	110	124,62	4,89	0,253	0,103	20	110	4,49	123,50	0,2056	0,101
20	120	135,63	3,11	0,121	0,112	20	120	2,55	134,75	0,053	0,091
	130						130				
20	140	157,12	0,26	$6,49 \cdot 10^{-4}$	0,098	20	140	0,01	157,37	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,082

przekładka pierwsza z przecięciem						przekładka trzecia bez przecięcia					
Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodz. przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podciosiomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Liczba pomiarów	Odległ. szpilki od uszkodz. przed pomiarem	Odległ. szpilki od uszkodz. podciosiomiaru	Średnia wartość kąta	Wariancja s^2	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$
-	mm	mm	°	/N/m ²	-	-	mm	mm	°	/N/m ²	-
20	10	19,62	39,86	4,296	0,052	18	10	11,50	5,57	0,224	0,085
18	20	30,00	37,19	6,208	0,067	20	20	23,50	5,65	0,156	0,074
20	30	40,5	35,13	6,576	0,073	20	30	33,50	8,01	0,485	0,087
20	40	51,62	31,94	5,288	0,072	20	40	45,50	9,03	0,690	0,092
20	50	62,75	25,82	3,174	0,069	16	50	58,27	7,43	0,655	0,109
20	60	73,87	23,39	1,4 · 10 ⁻³	0,038	20	60	68,51	8,24	0,286	0,065
20	70	84,5	21,38	0,384	0,029	20	70	79,75	9,46	0,103	0,034
20	80	95,63	17,54	1,920	0,079	20	80	91,00	8,73	0,603	0,089
18	90	107,50	12,88	1,794	0,104	20	90	102,25	6,72	0,442	0,099
20	100	117,87	10,90	1,141	0,098	20	100	113,15	6,04	0,635	0,132
20	110	128,75	6,36	0,334	0,091	20	110	124,25	5,84	0,678	0,141
20	120	140,12	5,13	0,273	0,102	20	120	135,5	4,27	0,144	0,089
	130						130				
20	140	162,37	0,74	6,2 · 10 ⁻³	0,107	20	140	160,97	3,34	0,132	0,109

7.7. Analiza wyników badań sprawdzających.

Na podstawie opracowania statystycznego kątów o jakie wychyliły się szpilki wyznaczono długości strefy wpływu zaburzeń oraz określono rozkłady naprężeń w poszczególnych przekładkach w następujący sposób, stosując trapezowy wzór /przybliżony/ dla obliczania całek oznaczonych [23] i przyjmując: $\tau = G \cdot \gamma = \frac{dG}{dx}$

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= \sigma_0 + \int_0^x \tau dx \\ \sigma &= \sigma_0 + G \int_0^x \gamma dx \quad | : \sigma_0 \\ \bar{\sigma} &= 1 + \frac{G \Delta x}{\sigma_0} \left[\frac{\bar{\gamma}_k}{2} + \sum \gamma \right] \end{aligned} \quad /7.7.1/$$

Wg. 7.7.1 określono naprężenie w 1 i 3 przekładce natomiast w środkowej przekładce z warunku równowagi

$$\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3 = 3 \quad /7.7.2/$$

Rozkłady naprężeń w przekładkach dla kolejnych przypadków przedstawiają tabele 7.7.1 - 7.7.9.

Tabela 7.7.1.

Rozkład naprężeń w przekładkach seria 1,

$$\sigma_0 = 27250 \text{ N/mm}^2$$

Odległość przed rozciąganiem	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2 strona przecięta	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	.	o	-	-	-
1	2	3	4	5	6
10	27,74	7,3900	0,5396	1,2659	1,1945
20	23,12	6,42	0,6871	1,1585	1,1544
30	18,15	7,19	0,8542	1,0309	1,1149
40	9,77	7,17	0,8878	1,0389	1,0733
50	7,99	4,68	0,9393	1,0218	1,0389
60	3,63	1,65	0,9730	1,0064	1,0206
70	2,50	1,96	0,9908	0,9991	1,0101
80	0,35	0,77	0,9990	0,9988	1,0022

Tabela 7.7.2.

Rozkład naprężeń w przekładkach seria 1,

$$\sigma_0 = 40875 \text{ N/m}$$

Odległość przed rozciąganiem	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2 strona przecięta	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	°	°	-	-	-
10	29,65	7,80	0,5975	1,2459	1,1566
20	25,42	8,20	0,7021	1,1717	1,1262
30	21,15	8,15	0,7906	1,1143	1,0951
40	16,37	7,10	0,8619	1,0720	1,0661
50	12,17	6,32	0,9161	1,0433	1,0406
60	9,80	4,61	0,9579	1,0222	1,0199
70	5,20	2,15	0,9864	1,0066	1,0070
80	1,00	0,79	0,9981	1,0004	1,0015

Tabela 7.7.3.

Rozkład naprężeń w przekładkach seria 1,

$$\bar{\sigma}_0 = 54500 \text{ N/m}$$

Odległość przed rozciąganiem	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2 strona przecięta	$\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_0}$	$\frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_0}$	$\frac{\bar{\sigma}_3}{\bar{\sigma}_0}$
mm	°	°	-	-	-
10	32,24	7,94	0,6060	1,2464	1,1476
20	31,15	8,52	0,6947	1,1808	1,1245
30	27,72	9,19	0,7771	1,1293	1,0997
40	22,14	8,31	0,8469	1,0779	1,0752
50	18,71	6,52	0,9041	1,0414	1,0545
60	10,10	6,13	0,9529	1,0103	1,0368
70	6,30	5,80	0,9842	0,9958	1,0201
80	2,18	3,10	0,9961	0,9963	1,0076
90	0,32	1,18	0,9996	0,9988	1,0016

Tabela 7.7.4.

Rozkłady naprężeń w przekładkach seria 2,

$$\sigma_0 = 27250 \text{ N/m}$$

Odległość od miejs- ca	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	o	o	-	-	-
10	31,84	4,71	0,3936	1,3964	1,21
20	23,75	6,12	0,5538	1,2623	1,1842
30	19,80	5,91	0,6793	1,1688	1,1519
40	14,44	5,82	0,7780	1,1016	1,1204
50	10,40	5,64	0,8496	1,0608	1,0896
60	8,04	4,92	0,9028	1,0359	1,0613
70	5,13	3,93	0,9407	1,0218	1,0375
80	3,87	2,53	0,9667	1,0131	1,0202
90	2,80	1,77	0,9859	1,0054	1,0087
100	1,04	0,59	0,9970	1,0006	1,0024
110	0,0	0,15	1,0000	1,0000	1,00040

Tabela 7.7.5.

Rozkłady naprężeń w przekładkach seria 2,

$\sigma_0 = 40875 \text{ N/m}$

Odległość od miejs- ca	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$
mm	o	o	-	-	-
10	39,54	5,97	0,3989	1,3759	1,2252
20	30,01	7,24	0,5336	1,2665	1,1999
30	24,93	7,32	0,6382	1,1899	1,1719
40	20,92	7,38	0,7251	1,1312	1,1437
50	16,74	6,98	0,7985	1,0854	1,1161
60	11,85	6,26	0,8535	1,0559	1,0906
70	10,04	6,10	0,8955	1,0376	1,0669
80	7,89	5,76	0,9304	1,0255	1,0441
90	7,17	3,22	0,9592	1,0139	1,0269
100	3,92	2,64	0,9803	1,0041	1,0156
110	2,81	1,96	0,9932	1,0001	1,0067
120	0,35	0,78	0,99932	0,99918	1,0014

Tabela 7.7.6.

Rozkłady naprężeń w przekładkach seria 2,

$$\sigma_0 = 54500 \text{ N/m}$$

Odległość od miejs- ca	Wartość kąta γ_1	Wartość kąta γ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	o	o	-	-	-
10	44,96	6,51	0,4196	1,3753	1,2051
20	37,30	8,46	0,4988	1,3176	1,1836
30	31,98	7,96	0,6310	1,2091	1,1599
40	26,72	9,46	0,7168	1,1484	1,1348
50	21,38	9,13	0,7853	1,1063	1,1084
60	16,28	7,89	0,8392	1,0773	1,0835
70	14,21	7,24	0,8832	1,0548	1,062
80	11,97	6,75	0,9209	1,0376	1,0415
90	10,03	4,35	0,9545	1,0196	1,0259
100	6,83	2,73	0,9769	1,0075	1,0156
110	3,93	2,74	0,9924	0,9998	1,0078
120	0,65	1,23	0,9990	0,9993	1,0017

Tabela 737.7.

Rozkłady naprężeń w przekładkach seria 3,

$$\sigma_0 = 27250 \text{ N/m}$$

Odległość przed rozciąg.	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	o	o	-	-	-
10	30,30	3,85	0,2388	1,4306	1,3306
20	25,74	4,55	0,4013	1,2923	1,3064
30	23,39	4,61	0,5437	1,1759	1,2804
40	18,12	6,86	0,6641	1,0887	1,2472
50	13,52	6,00	0,7559	1,0331	1,2110
60	10,54	6,03	0,8256	0,9945	1,1767
70	7,78	6,91	0,8788	0,9813	1,1399
80	6,38	5,24	0,9198	0,9750	1,1052
90	4,01	4,6	0,9500	0,9728	1,0772
100	3,36	5,06	0,9713	0,9790	1,0497
110	2,26	3,22	0,9876	0,9863	1,0261
120	1,01	2,97	0,9971	0,9945	1,0084
130	-0,37	2,91	1,0010	0,9908	1,0082

Tabela 7.7.8.

Rozkłady naprężeń w przekładkach seria 3,

$$\sigma_0 = 40875 \text{ N/m}$$

Odległość przed rozciąg.	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	°	°	-	-	-
10	37,00	4,58	0,2703	1,4540	1,2757
20	31,36	5,30	0,4009	1,3422	1,2569
30	29,68	6,43	0,5162	1,2491	1,2347
40	25,81	8,27	0,6216	1,1716	1,2068
50	19,79	8,01	0,7083	1,1158	1,1759
60	16,68	7,72	0,7772	1,0768	1,1460
70	14,45	7,83	0,8485	1,0351	1,1164
80	11,76	6,93	0,8865	1,0252	1,0883
90	8,89	6,99	0,9257	1,0124	1,0619
100	6,85	5,76	0,9556	1,0068	1,0376
110	4,89	4,49	0,9780	1,0038	1,0182
120	3,11	2,55	0,9932	1,0020	1,0048
140	0,26	0,00	0,9996	1,0004	1,000

Tabela 7.7.9.

Rozkłady naprężeń w przekładkach seria 3,

$$\sigma_0 = 54500 \text{ N/m}^2$$

Odległość przed rozciąg.	Wartość kąta δ_1	Wartość kąta δ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
mm	o	o	-	-	-
10	38,86	5,57	0,3061	1,4544	1,2395
20	37,19	5,65	0,4126	1,3636	1,2238
30	35,13	8,01	0,5138	1,2816	1,2046
40	31,94	9,03	0,6077	1,2115	1,1808
50	25,82	7,43	0,6886	1,1537	1,1577
60	23,39	8,24	0,7575	1,1067	1,1358
70	21,38	9,46	0,8202	1,0688	1,1110
80	17,54	8,73	0,8747	1,0397	1,0856
90	12,88	6,72	0,9173	1,0188	1,0639
100	10,90	6,04	0,9505	1,0034	1,0461
110	6,36	5,84	0,9747	0,9959	1,0294
120	5,13	4,27	0,9908	0,9939	1,0153
140	0,74	3,34	0,9990	0,9964	1,0046

8. Analiza wyników badań

W badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych dla weryfikacji wyprowadzonych w niniejszej pracy metod obliczania rozkładu naprężeń zastosowano próbki wycięte z taśmy trójprzekładkowej. Aby uzyskać pełną porównywalność wyników tych badań z wynikami obliczeń rozkładu naprężeń obliczono przyjmując wymiary geometryczne i własności przekładek pomierzone dla każdej serii próbek z osobna /tabela 7.3.1/.

Rozwiązano układ równań wg. modelu matematycznego zapisanego wzorami 4.4.1 /rozd. 4/. Wartości stałych wyznaczono z równań 4.4.2. Obliczono długości stref wpływu zaburzeń i rozkładu naprężeń w przekładkach dla trzech serii próbek zastosowanych w badaniach sprawdzających.

W tabeli 8.1. zestawiono wartości średnie długości stref wpływu zaburzeń wyznaczone z badań laboratoryjnych oraz na drodze teoretycznej bez uwzględnienia losowej zmienności modułu sprężystości.

Tabela 8.1.

Długości stref wpływu zaburzeń

Nr partii	Siła rozciągająca	Długość strefy wyznaczona z pomiarów	Długość strefy zaburzeń wyznaczona dla modelu wg. $E_p = \text{const}$
-	N	m	m
1	4905	0,08	0,724
	7357,5	0,08	
	9810	0,09	
2	4905	0,11	0,1011
	5357,5	0,12	
	9810		
3	4905	0,14	0,1130
	5357,5	0,14	
	9810	0,14	

Porównując wartości zestawionych w tabeli 8.1. można stwierdzić, że pomierzone strefy są większe od obliczonych teoretycznie o 10,49 % - 23,89 %. Różnice tych wielkości rosną wraz ze wzrostem siły rozciągającej.

Można to tłumaczyć wzrostem modułu sprężystości przekładek, czego nie uwzględniono w obliczeniach teoretycznych przyjmując średni moduł określony dla badanych granic sił. Badania potwierdziły zależność długości stref zaburzeń od parametrów ujętych współczynnikiem λ .

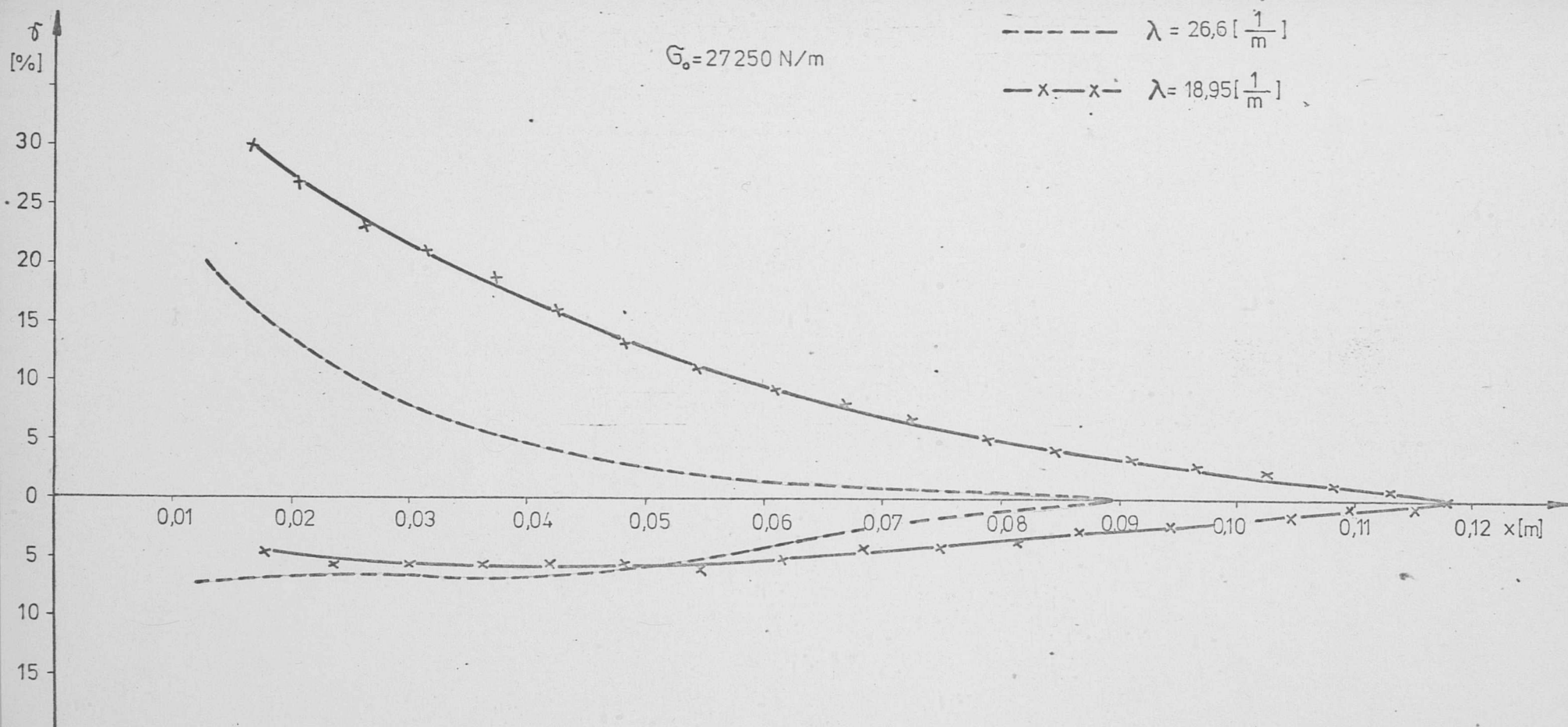
Rys. 8.1. przedstawia otrzymane w pomiarach wartości kątów odkształceń gumy międzyprzekładkowej między pierwszą a drugą przekładką oraz między trzecią a drugą przekładką pierwszej i trzeciej serii próbek. Przy zastosowaniu metody obliczeń z uwzględnieniem zmienności losowej obliczenia wykonano wg. układu równań 5.2. Określenie strefy wpływu można wyznaczyć w miejscu wyrównania się naprężeń do stanu początkowego, który jest równy rozkładowi naprężeń w przekładkach wywołanym rozciąganiem próbki bez przecięcia. Ocenę poprawności obliczeń teoretycznych rozkładu naprężeń umożliwia porównanie wyników pomiarów zestawionych w tabelach 8.2, 8.3, 8.4 z rozkładami obliczonymi teoretycznie i zestawionymi w tabelach 7.7.1 ÷ 7.7.9.

Dla łatwiejszej oceny wyników na rys. 8.2, 8.3 przedstawiono przykładowo wykresy rozkładów:

- pomierzonych laboratoryjnie
- obliczonych teoretycznie bez uwzględnienia zmienności modułu sprężystości, skorygowanych w celu wyeliminowania błędu popełnionego w wyniku przyjęcia w modelu $\operatorname{tg} \gamma = \gamma$,
- obliczonych z uwzględnieniem zmienności modułów sprężystości.

Charakter krzywych jest zbliżony. Krzywa rozkładu obliczonego z uwzględnieniem zmienności modułu sprężystości wykazuje mniejsze odchyłki od krzywej uzyskanej na drodze pomiarowej, niż krzywa obliczona bez uwzględnienia tej zmienności. Maksymalne różnice między tymi krzywymi wynoszą 5 - 7 % wartości stosunku naprężeń $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$ i do 10 % $\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$.

Na tej podstawie można stwierdzić, że wyprowadzony w pracy model uwzględniający zmienność modułów sprężystości z zadowalającą dokładnością odzwierciedla rzeczywisty rozkład naprężeń w przekładkach w przypadku gdy jedna z nich ulega przecięciu.



Rys. 8.1 Wartość mierzonych kątów w strefie zaburzeń.

Tabela 8.2.

Rozkład naprężeń w przekładkach próbek serii 1

x [m]	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
0,00	0	1,6614	1,3386
0,01	0,1359	1,6554	1,2087
0,02	0,3034	1,5786	1,1180
0,03	0,4922	1,4526	1,0552
0,04	0,6782	1,3008	1,0210
0,05	0,8377	1,1575	1,0048
0,06	0,9495	1,0500	1,0005
0,07	1,000	1,000	1,000

Tabela 8.3.

Rozkład naprężeń w przekładkach próbek, seria 2

x [m]	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
0,00	0,0000	1,6614	1,3386
0,01	0,09094	1,6628	1,2446
0,02	0,2022	1,6628	1,1688
0,03	0,3287	1,6290	1,1075
0,04	0,4636	1,5637	1,0571
0,05	0,5987	1,4792	1,0323
0,06	0,7257	1,3689	1,0140
0,07	0,8359	1,2602	1,0049
0,08	0,9220	1,1592	1,0011
0,09	0,9779	1,0768	1,0002
0,10	1,0000	1,0000	1,0000

Tabela 8.4.

Rozkład naprężeń w przekładkach próbek, seria 3

x	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
m	-	-	-
0,00	0,000	1,6614	1,3386
0,01	0,0803	1,6610	1,2586
0,02	0,1772	1,6389	1,1839
0,03	0,2872	1,5509	1,1618
0,04	0,4061	1,5142	1,0796
0,05	0,5279	1,4255	1,0466
0,06	0,6467	1,3288	1,0244
0,07	0,7563	1,2325	1,0111
0,08	0,8510	1,1448	1,0041
0,09	0,9255	1,0734	1,0011
0,10	0,9757	1,0241	1,0002
0,11	0,9986	1,0012	1,0001
0,12	1,0000	1,0000	1,0000

Tabela 8.5.

Rozkład obciążeń w przekładkach
z uwzględnioną zmiennością.

Rozkład obliczono dla wartości modułów sprężystości
otrzymanych z pomiarów

$$E_{p1} = 6,9 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

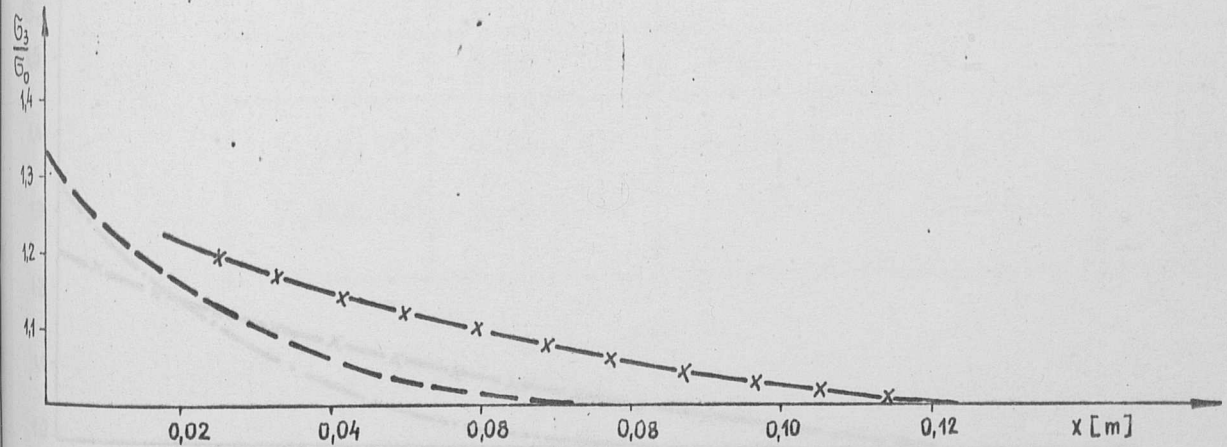
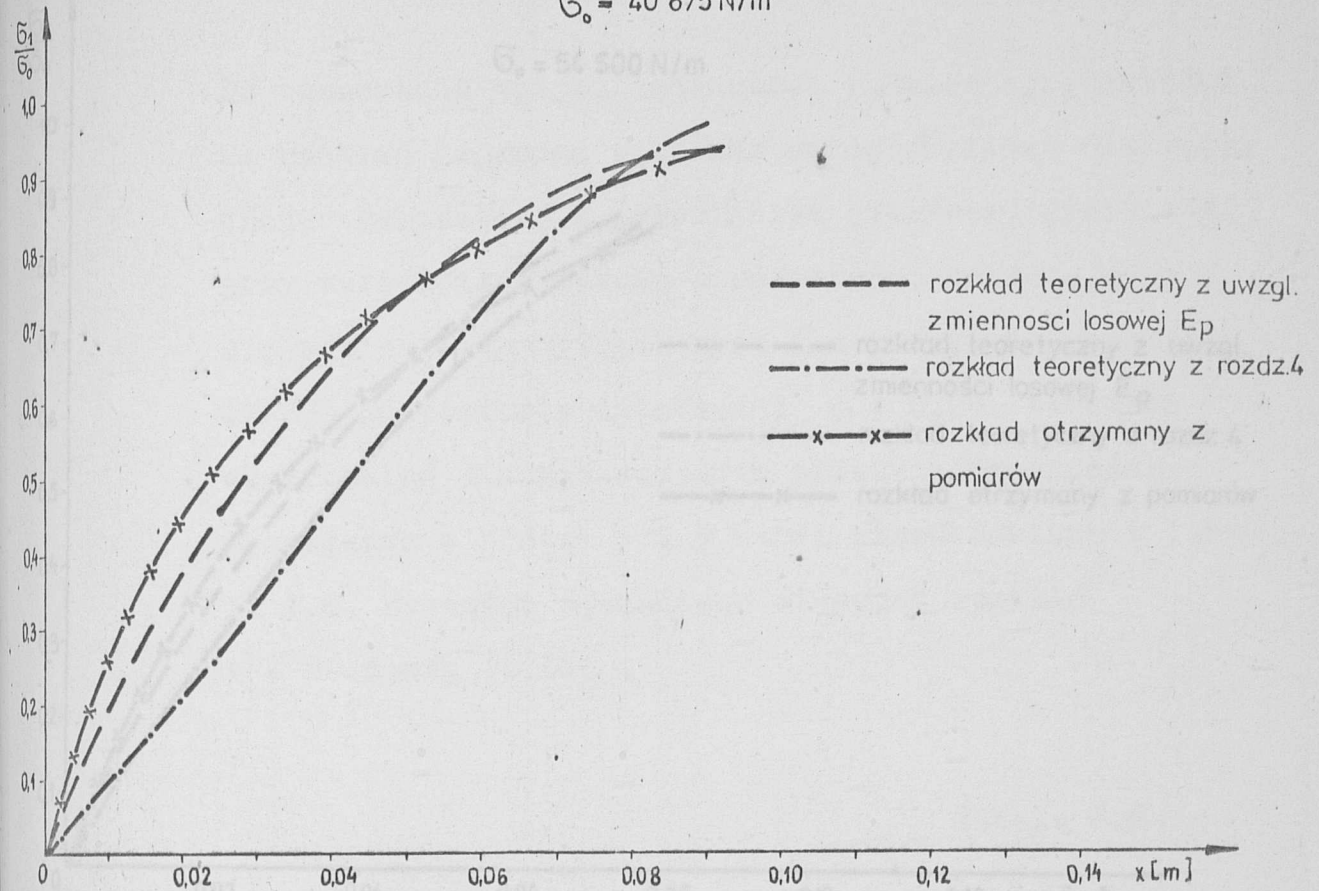
$$E_{p2} = 7,1 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

$$E_{p3} = 7,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

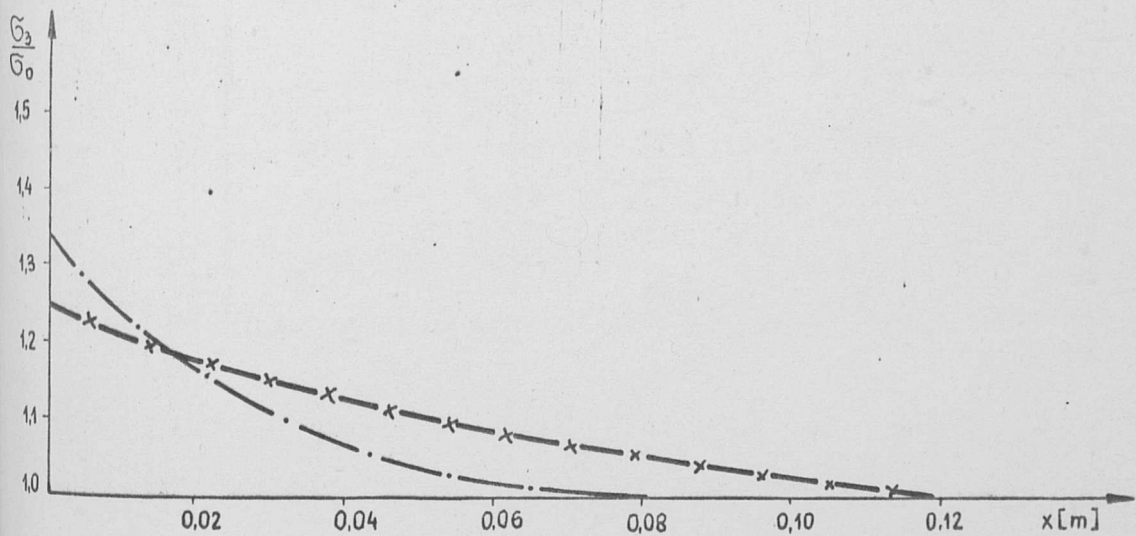
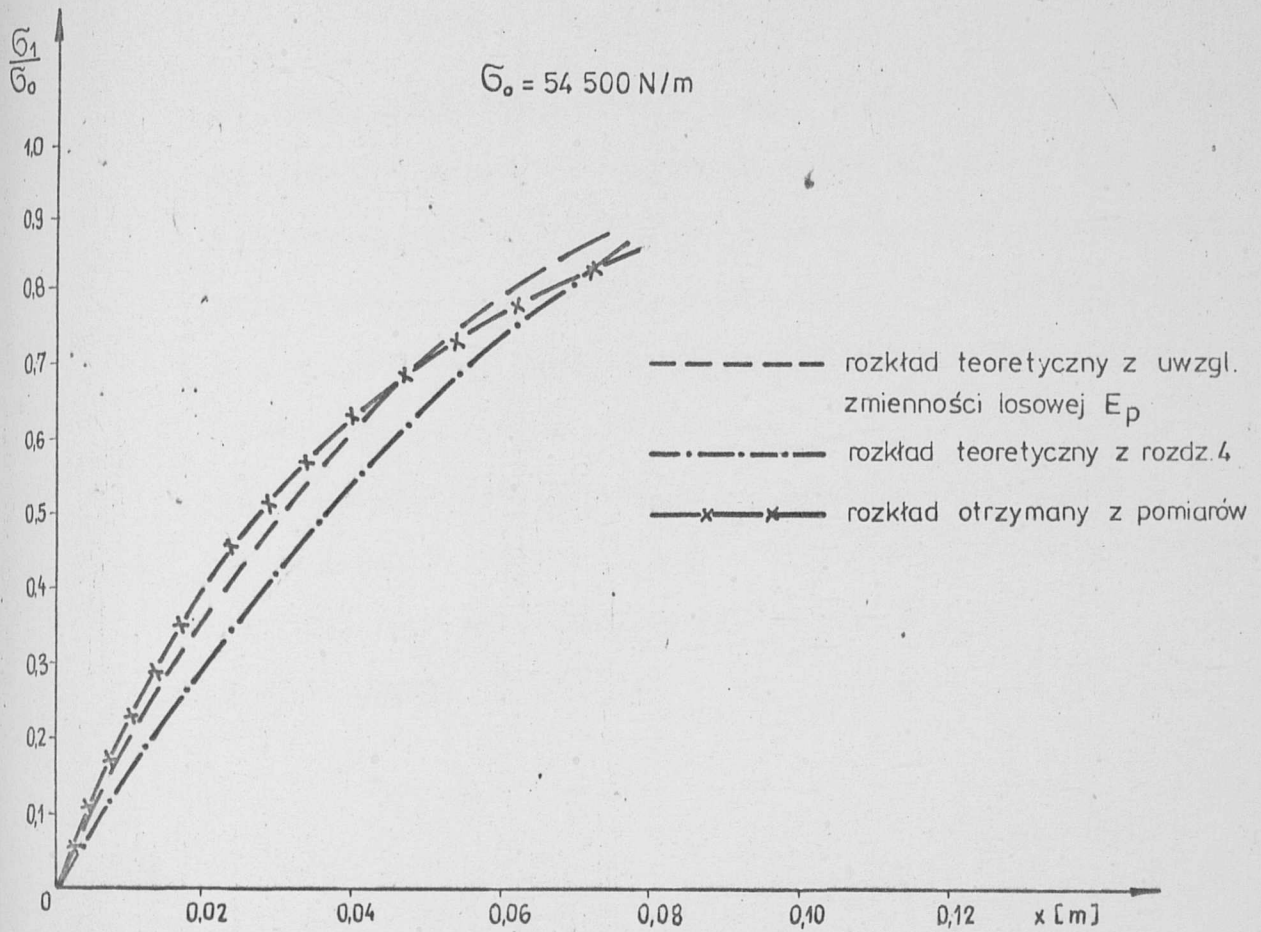
x	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
m	-	-	-
0	0	1,653	1,347
0,02	0,3563	1,525	1,120
0,04	0,6222	1,328	1,049
0,06	0,8902	1,101	1,0083
0,08	0,998	0,9770	1,0241

$$\sigma_0 = 40\,875 \text{ N/m}$$

$$\sigma_0 = 51\,500 \text{ N/m}$$



Rys. 8.2. Rozkłady naprężeń w 1 i 3 przekładce



Rys. 8.3. Rozkłady naprężeń w 1 i 3 przekładce.

Do oznaczania wpływu zmienności modułów sprężystości na rozkład naprężeń wykonano serię obliczeń dla taśmy trójprzekładowej z przecięciem pierwszej przekładki przy wartościach modułu sprężystości zmieniających się w granicach wyznaczonych dla przekładek taśmy TK-250 na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wartości ekstremalne dla wyznaczonych przedziałów ufności przekładek z próbek 1 i 3 serii przedstawiono w tabeli 8.6. Wartości wyznaczono stosując rozkład t - Studenta [8.31] .

Tabela 8.6.

Ekstremalne wartości modułów sprężystości

Wartość średnia	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Współczynnik zmienności $\alpha = \frac{s}{\bar{x}}$	Poziom istotności α
N/m	N/m	N/m	-	-
$5,92 \cdot 10^5$	$4,98 \cdot 10^5$	$6,86 \cdot 10^5$	0,10	0,05
$7,20 \cdot 10^5$	$5,825 \cdot 10^5$	$8,574 \cdot 10^5$	0,12	0,05

Obliczone z 5.2 długości stref zaburzeń i rozkłady obciążeń w przekładkach w punkcie najbardziej niebezpiecznym tzn. w miejscu przecięcia przekładki zewnętrznej przedstawia tabela 8.8.

Tabela 8.8.

Rozkłady obciążeń w przekładkach w miejscu przecięcia 1 przekładki

Nr serii	Nr przekładki	Wartość modułów sprężystości	Długość strefy wpływu	$\frac{\sigma_2}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_0}$
-	-	N/m	m	-	-
1	1	$5,92 \cdot 10^5$	0,08	1,2281	1,7719
	2	$4,98 \cdot 10^5$			
	3	$6,86 \cdot 10^5$			
	1	$5,92 \cdot 10^5$	0,0653	2,0466	0,9534
	2	$6,86 \cdot 10^5$			
	3	$4,98 \cdot 10^5$			
3	1	$7,20 \cdot 10^5$	0,103	2,128	0,872
	2	$8,574 \cdot 10^5$			
	3	$5,874 \cdot 10^5$			
	1	$7,20 \cdot 10^5$	0,1295	1,138	1,862
	2	$5,874 \cdot 10^5$			
	3	$8,574 \cdot 10^5$			
1	1,2 3	5,92	0,072	1,6614	1,3386
3	1,2,3	7,20	0,113	1,6614	1,3386

Wyniki w tabeli 8.8. wykazują jak duży wpływ na zmianę rozkładu naprężeń w taśmie ma zmienność własności sprężystych przekładek. Naprężenia dla wartości ekstremalnych przekraczają znacznie naprężenia obliczone przy założeniu, że własności sprężyste wszystkich przekładek są jednakowe. Jeżeli zmienność przekładek wynosi 10 % to maksymalnie naprężenie w przekładce sąsiedniej, przekładki przeciętej wzrastają dwukrotnie. Przy większych zmiennościach dla wartości ekstremalnych wartość ta może być wyższa od 2,0 /tabela 8.8/.

Dla stałej wartości modułów sprężystości maksymalne naprężenie dla tego wariantu wynosi 1,66.

Wynika stąd jak bardzo jakość produkowanych taśm, a szczególnie stałość parametrów sprężystości wpływa na wielkość maksymalnego naprężenia występującego w przekładce pod obciążeniem.

9. Metoda doboru taśm przenośnikowych

Obliczenia wykonane przy pomocy wyprowadzonego modelu matematycznego wykazały, że naprężenia przenoszone przez przeciętą przekładkę nie rozkłada się w rozpatrywanym przekroju taśmy równomiernie na nieprzecięte przekładki. Rozkład naprężeń w przekładkach nieuszkodzonych przejmujących obciążenie przekładki przeciętej jest zależny od położenia przeciętej przekładki a wartości obciążenia maksymalnego przenieszonego przez przekładki sąsiadujące zależą będzie od liczby przekładek, miejsca występowania uszkodzenia w przekroju taśmy oraz od stałości parametrów sprężystych przekładek, z których wykonana jest taśma. W przypadku taśm bardzo wysokiej jakości, wykazujących małą zmienność modułów sprężystości maksymalne naprężenie przenoszone przez przekładkę sąsiadującą z przeciętą występują przy przecięciu przekładki zewnętrznej i są niezależne od wartości modułu sprężystości.

Stosunek maksymalnego przyrostu naprężeń wywołanego przecięciem przekładki do naprężenia średniego występującego w przekładkach poza strefą zaburzoną określa współczynnik spiętrzenia naprężeń:

$$k_m = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$

Wartości tego współczynnika obliczone przy założeniu, że moduł sprężystości wszystkich przekładek jest jednakowy podano w tabeli 9.1. dla przypadku najbardziej niebezpiecznego przy przecięciu pierwszej przekładki.

Tabela 9.1.

Wartość współczynnika k_m

Liczba przekładek	Współczynnik k_m
6	1,66
5	1,66
3	1,67

W granicach stosowanych obecnie liczby przekładek współczynnik ten jest niemal niezależny od liczby przekładek.

Wartości współczynnika k_m ulegają zmianie, gdy moduły sprężystości przekładek są różne, a biorąc pod uwagę, że dla doboru taśmy miarodajne są wartości graniczne, najniekorzystniejsze, współczynnik ten jest tym większy im większa jest zmienność własności taśmy.

Analiza losowej zmienności wartości modułu sprężystości dla taśmy trójprzekładkowej wykazała, że dla taśm krajowych zmienność tego parametru wynosi 10 - 12,4 %. W wyniku przyjęcia tej zmienności do obliczeń wartości współczynnika k_m obliczone dla ekstremalnych wartości z przedziału ufności określonego z prawdopodobieństwem 0,95 dla powyższej zmienności zestawiono w tabeli 9.2.

Tabela 9.2.

Wartość współczynnika k_m dla taśmy trójprzekładkowej

Liczba przekładek	Średnia wartość modułu	k_m
3	5,92	2,12
3	7,20	2,02

Porównując wartości z tabeli 9.1. i 9.2 widać znaczny wpływ jakości wykonania taśm na maksymalne naprężenie w przekładce jakie może wystąpić przy przecięciu przekładki zewnętrznej.

Proponuje się przy doborze taśmy uwzględnić nierówność rozkładu naprężeń w przekładkach i wytrzymałość taśmy obliczać z wzoru:

$$K_n = \frac{k_e \cdot S_{\max r} \cdot k_m}{B} \quad /N/m/$$

Dla taśm o zmienności losowej modułu sprężystości nie przekraczającej 5 % proponuje się przyjmować $k_m = 1,7$.

Dla taśm o większej zmienności należy obliczyć współczynnik k_m metodą podaną w niniejszej pracy.

Przy uwzględnieniu w obliczeniach współczynnika spiętrzenia naprężeń k_m należy skorygować współczynnik bezpieczeństwa. Zaleca się przyjęcie $k_e = 4,0$. Oznacza to, że w czasie rozruchu dopuszcza się przyrost naprężenia w jednej z przekładek do 25 % naprężenia zrywającego. Odpowiada to w przybliżeniu wartościom dopuszczanym dotychczas przez producentów: 10 do 11 % w ruchu ustalonym i 12 do 15 % naprężenia zrywającego w miejscu nieuszkodzonym w czasie rozruchu.

Wyniki badań wykazały natomiast, że bezpodstawne jest uzależnianie spiętrzenia naprężeń od liczby przekładek, a tym samym stosownie do obliczeń wzoru /1.12/ jest błędne.

10. Wnioski

1. Wyprowadzony model matematyczny tkaninowej taśmy wieloprzekładkowej pozwala na określenie wpływu przecięcia przekładki na rozkład naprężeń w pozostałych przekładkach oraz obliczenie długości strefy wpływu zaburzeń z uwzględnieniem losowej zmienności parametrów sprężystości.
2. Analiza teoretyczna i wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły słuszność postawionej tezy i wykazały, że rozkład naprężeń wzdłużnych w przekładkach w strefie zaburzeń spowodowanych przecięciem jednej z nich zależy od miejsca wystąpienia uszkodzenia w przekroju poprzecznym taśmy, liczby przekładek oraz zmienności modułu sprężystości przekładek a długość strefy wpływu zależy od:
 - modułu odkształcenia postaciowego warstwy międzyprzekładkowej
 - modułu sprężystości przekładek
 - parametrów geometrycznych taśmy

3. Rozkłady naprężeń w przekładkach oraz długości strefy wpływu zaburzeń wyznaczone na drodze teoretycznej z uwzględnieniem losowej zmienności parametrów sprężystych taśmy są dostatecznie bliskie otrzymanych z badań laboratoryjnych ażeby uznać uproszczenia wprowadzone w modelu teoretycznym za dopuszczalne.
4. Uzyskana dokładność obliczeń jest wystarczająca do celów praktycznych i opracowany model może być stosowany w obliczeniach inżynierskich.
5. W przekroju taśmy w pobliżu przecięcia jednej przekładki naprężenia nie rozkładają się równomiernie na przekładki, w związku z czym stosowanie metody doboru taśmy oparte na założeniu, że spowodowany przeciętnie przyrost naprężeń jest równy $\frac{z}{z-1}$ jest nieściśle.
6. Stosunkowo duża zmienność modułów sprężystości taśm produkcji krajowej wynosząca 10 - 12% - w znacznym stopniu wpływa na rozkład obciążeń w przekładkach i konieczne jest jej uwzględnienie w metodzie doboru taśm.

7. Zaleca się dobierać taśmę wg metody przedstawionej w rozdziale 9. Metoda ta uwzględnia maksymalny przyrost naprężeń w przekładkach w najbardziej niebezpiecznych przekrojach i uwzględnia losową zmienność własności sprężystych przekładek.

1. Białous J., Kobuszka J., Wpływ metody elastycznej na wytrzymałość taśm na przesłanie. Wrocław, 1971, OCBPSC-Politechniki Wrocławskiej, niepublikowane
2. Białous J., Prokaj J., Główne przyczyny niebezpiecznego przesłania taśm przenośnikowych w kopalniach odkrywkowych. OCBPSC-Politechniki Wrocławskiej Specjalne, 1970, nr 29
3. DIN 22101 - Gurteigenschaften, Beanspruchungsgrundlagen, 1942
4. Gabryszewska B., Okoń J., Gurty i taśmy techniczne. Orłowski J., Słupa W.: Właściwości taśm i przekładek nitowanych w zależności od rodzaju i rodzaju średniej $F_{ar} / k_{g_{ar}}$ dla taśm używanych. Instytut Materiałoznawstwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1965, niepublikowane

L I T E R A T U R A

1. Antoniak J. Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach, Wydawnictwo Śląsk. Katowice, 1976
2. Bielous J., Komander H. Wpływ nadawy elastycznej na wytrzymałość taśm na przebicie. Wrocław, 1971, COBPGO-Poltegor, niepublikowane
3. Bielous J., Prekl J. Główne przyczyny niszczenia taśm przenośnikowych w kopalniach odkrywkowych. COBPGO-Poltegor Zeszyty Specjalne, 1970, nr 50
4. DIN 22101 - Gurtföhrer. Berechnungsgrundlagen, 1942
5. Gabryszewska B., Okołów B. Określenie modułu sprężystości taśmy z przekładkami styłonowymi w zależności od $\Delta P / \Delta k_G$ i siły średniej $P_{\text{sr}} / k_G \text{ sr}$ dla taśm używanych. Instytut Materiałoznawstwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1965, niepublikowane

6. Gładysiewicz L., Hardygóra M., Żur T. Model tkaninowej taśmy wieloprzekładowej. Referat na XVI Sympozjum PTMTiS "Modelowanie w Mechowice" Wisła, 1977
niepublikowane
7. Gładysiewicz L., Osieka G., Szymański J., Wajda A., Żur T. Określenie prędkości rozchodzenia się fali napięcia w polskich taśmach przenośnikowych. Raporty Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975, niepublikowane
8. Greń J. Modele i zadania statystyki matematycznej. PWN, Warszawa, 1968
9. Haman Z., Wypych R. Badania stacji zwrotnej z taśmą podpierającą. Wrocław, 1973, COBPGO-Poltegor, niepublikowane
10. Hardygóra H. Metoda pobierania próbek do badań wytrzymałości taśm przenośnikowych produkcji krajowej. Górnictwo Odkrywkowe, nr 12, 1977 /w druku/
11. Hardygóra M., Soroczyński H., Żur T. Taśmy do przenośników. Wykonanie badań wytrzymałościowych i opracowanie wyników oraz zaleceń obliczeniowych i konstrukcyjnych. Raporty Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1976, niepublikowane

12. Hardygóra M., Żur T. Badania nowych typów taśm tekstylnych dla górnictwa rud. Raporty Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1975, niepublikowane
13. Kalnickij Ja.B. Dolgovečnost konveernych lent na gornorudnych predprijatjach. Trudy Instytuta "Gipronikel", 1964, nr 18
14. Komander H., Palczak Cz. Opracowanie danych wyjściowych dla taśm odpornych na przebicie i ścieranie. Wrocław, 1969, COBPGO-Poltegor, niepublikowane
15. Komander H. Wpływ kształtu i wymiarów próbek do oznaczania wytrzymałości na rozciąganie taśm przenośnikowych na wynik pomiaru oraz badania taśm wykonanych z tkaniny PT-47 i PTW. Wrocław 1973, COBPGO-Poltegor, niepublikowane
16. Komander H., Biełous T. Badania i klasyfikacja taśm przenośnikowych tkaninowo-gumowych produkcji ZGG Bytom-Miechowice. Wrocław, 1974, COBPGO-Poltegor, niepublikowane

17. Kubicki J., Polewczak W. Badanie wytrzymałościowe taśmy i wykonanie złącz. Wrocław, 1975, COBPGO-Poltegor, niepublikowane
18. Łuczewski Z. Wpływ geometrii urządzenia przesypowego na obciążenie dynamiczne krążników przenośnika taśmowego w transporcie rud miedzi. Rozprawa doktorska Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1976
19. Matow A.L., Szapowolow A.A. Wulkanizacja konwersyjnych le t. Izdatelstwo "Niedra", Moskwa, 1967
20. Matting A., Heidemann A. Beitrag zum dynamischen Testigkeit sverhalten von FÜRdegurt - Problem in Abhängigkeit von definierten Fehlern, Kautschuk u. Gummi, 1961, nr 11
21. Matwiejew N.M. Metody całkowania równań różniczkowych zwyczajnych. PWN, Warszawa, 1972
22. Mielientiew Ju.J., Szczierinowa E.N. K woprosu dolgozaguzun A.T, Żarkow W.M wiecznosti lentocznych tjugowych organow. Gornyj Żurnal, 1974, nr 8

23. Mostowski A., Stark M. Algebra wyższa, cz.II
PWN Warszawa, 1954
24. Moszyński K. Rozwiązywanie równań różniczkowych
zwyczajnych na maszynach cyfrowych. WNT Warszawa,
1971
25. Pietrowski J.G. Równanie różniczkowe zwyczajne.
PWN Warszawa, 1967
26. Poradnik Inżyniera Mechanika. T.2. WNT Warszawa,
1969
27. Quaas H. Prüfung von Gummifördergurten mit
Gewebeeinlagen. Bergbautechnik, 1965, nr 10
28. Ściegosz W. Naprężenia w taśmie przenośnika.
Obliczenie ilości przekładek. Węgiel Brunatny,
1962, nr 1
29. Vierling A. Zur Theorie der Baudförderung.
Continental Transportbaud-Dienst nr 8

35. Zawgorodnyj E. Ob izgibie mnogoskojnych sistem tipa konwiejevnych lent po krugowej cilindriczeskoj powierchnosti. Gornyj Żurnał, 1975, nr 11
36. Żur T. Metoda obliczenia trwałości taśm. Górnictwo Odkrywkowe, 1976, nr 1
37. Żur T. Transport taśmowy w kopalniach odkrywkowych cz. I. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1966
38. Żur T. Urządzenia transportowe w górnictwie cz.II. Transport taśmowy. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1974

