

JACEK ZARZYCKI

Wpływ wybranych parametrów na wartość modułu sprężystości taśm przenośnikowych z rdzeniem poliestrowo-poliamidowym

W artykule zestawiono informacje na temat wpływu wybranych czynników na wartość modułu sprężystości taśm przenośnikowych z rdzeniem tekstylnym. Przedstawiono metodę badania modułu sprężystości w warunkach laboratoryjnych, wskazano, jak wartość modułu sprężystości zmienia się w zależności od zakresu obciążenia oraz temperatury. Moduł sprężystości jest to parametr, którego wartość jest niezbędna do poprawnego projektowania w szczególności długich i niekonwencjonalnych przenośników taśmowych.

Słowa kluczowe: taśmy przenośnikowe, moduł sprężystości, wpływ temperatury i obciążenia

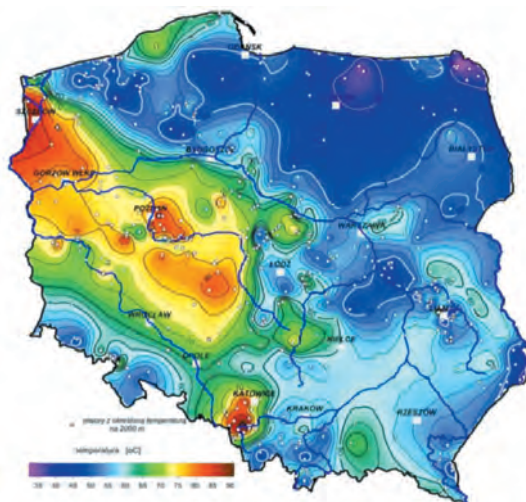
1. WSTĘP

Przenośniki taśmowe pełnią w przemyśle bardzo ważną rolę jako niezawodny środek transportu materiałów na ograniczone odległości. Znajdują zastosowanie w wielu miejscach, jednak największe parametry pracy osiągają w przemyśle wydobywczym [1, 2]. W Polsce przemysł wydobywczy, gdzie przenośniki mają szczególne znaczenie, obejmuje przede wszystkim kopalnie odkrywkowe węgla brunatnego oraz surowców skalnych, a pod ziemią kopalnie węgla kamiennego i rudy miedzi. Przenośniki eksploatowane w kopalniach węgla brunatnego najczęściej wyposażone są w taśmy z rdzeniem wykonanym z linek stalowych. Wpływ czynników zewnętrznych, takich jak np. temperatura, na zmianę własności sprężysto-tłumiących takich taśm jest nieznaczący [2].

Eksploatacja w kopalniach podziemnych wiąże się ze schodzeniem na coraz większe głębokości. To natomiast powoduje wzrost temperatury, odczuwalny dla ludzi, ale także mający wpływ na elementy maszyn i urządzeń [3]. Pomiary geologiczne pokazują, że w zależności od miejsca na Ziemi warunki na określonych głębokościach znacznie się od siebie różnią. Zmiany temperatur pod powierzchnią Ziemi określa stopień geotermiczny [$m/^{\circ}C$], a oznacza odległość mierzoną w głąb Ziemi, która odpowiada wzrostowi temperatury o $1^{\circ}C$. Średni stopień geotermiczny w Europie wynosi $33 m/^{\circ}C$, a w Polsce $47 m/^{\circ}C$. Oznacza to, że przy założeniu średniej rocznej temperatury na powierzchni naszego kraju na poziomie $10^{\circ}C$ na głębokości 1 km

występuje temperatura około $30^{\circ}C$. Jednak w zależności od miejsca, nawet rozpatrując tylko teren Polski, temperatura skał na głębokości 2 km jest bardzo różna i waha się od $35^{\circ}C$ do nawet $90^{\circ}C$ [4].

Na rysunku 1 można zauważyć, że najwyższe temperatury występują w rejonie Górnego Śląska, ale także w miejscu eksploatacji rud miedzi. Temperatura podczas pracy ludzi w kopalni nie powinna przekraczać $28^{\circ}C$, a progowa wartość, przy której wszelkie prace powinny być wstrzymane, wynosi $33^{\circ}C$. Obecnie temperatura skał w miejscu eksploatacji rud miedzi dochodzi do $45^{\circ}C$ [1], dlatego niezbędne jest wymuszone chłodzenie. Oczywiście wysoka temperatura ma niekorzystny wpływ na zdrowie człowieka, ale także na elementy maszyn.

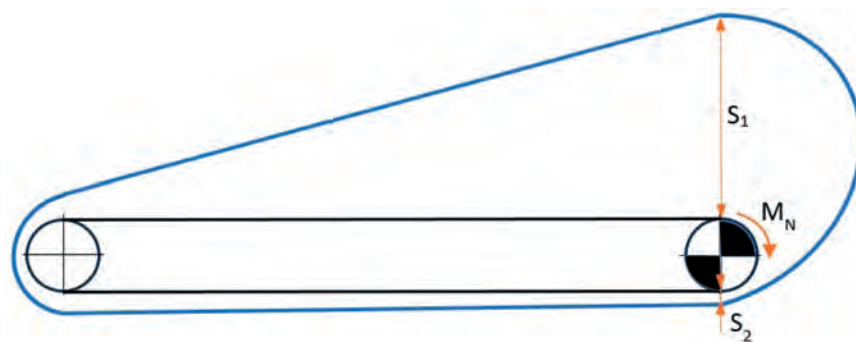


Rys. 1. Mapa temperatury na głębokości 2000 m [4]

Taśmy przenośnikowe eksploatowane w kopalniach podziemnych najczęściej wyposażone są w rdzeń tkaninowy, którego właściwości sprężyste są ściśle uzależnione od temperatury [5]. Standardowy zakres zastosowań taśm z gumowym wypełnieniem rdzenia wynosi od -25°C do $+60^{\circ}\text{C}$, natomiast w przypadku wypełnienia rdzenia PCW zakres ten wynosi od $+5^{\circ}\text{C}$ do $+60^{\circ}\text{C}$. Jak widać, jest to zakres, który nie wybiega poza wartości temperatury, jakie panują nawet na największych głębokościach obecnej eksploatacji złóż węgla kamiennego czy rud miedzi. Jednak właściwości taśm przenośnikowych w skrajnie różnych temperaturach znacznie się od siebie różnią. Przykładem właściwości silnie zmieniającej się wraz z temperaturą otoczenia jest moduł sprężystości, który jest zależnością między wydłużeniem i naprężeniem przy jednoosiowym rozciąganiu [5–7]. Moduł sprężystości

taśm tkaninowych o tej samej wytrzymałości może się znacznie różnić w zależności od rodzaju tkanin zastosowanych do budowy rdzenia, a także samej jego konstrukcji.

Innym czynnikiem mającym wpływ na wartość modułu sprężystości taśm przenośnikowych może być zakres i charakter obciążenia. Podczas normalnej pracy przenośnika taśmowego taśma poddawana jest cyklicznemu obciążaniu i odciążaniu w rejonie napędu przenośnika. Zakres sił zmienia się od maksymalnej S_1 do minimalnej S_2 . Dla poprawnie dobranej taśmy wartość siły S_1 wynosi najczęściej około 10% wytrzymałości taśmy na rozciąganie K_r , natomiast S_2 to około 2% K_r . Wartość zakresu obciążenia taśmy w przenośniku wynika z warunku odpowiedniego sprzężenia ciernego między taśmą a bębnem oraz minimalnego zwisu taśmy między zestawami krążnikowymi [1, 2].



Rys. 2. Wykres sił w taśmie przenośnika podczas pracy ustalonej

W podziemnych kopalniach rud miedzi czy węgla kamiennego najczęściej stosuje się taśmy tkaninowe poliestrowo-poliamidowe o różnej liczbie przekładek. Takie zestawienie tkanin powoduje niewielkie wydłużenie wzdłużne przy równoczesnym dobrym układaniu się w nieckę [2].

Podczas procesu projektowania przenośnika znajomość wartości modułu sprężystości taśmy jest niezbędna do [1, 8–10]:

- obliczeń długości drogi napinania taśmy podczas nieustalonych stanów pracy przenośnika,
- analizy rozkładu obciążeń bębnow napędowych,
- wyznaczenia prędkości rozchodzenia się fali naprężeń w taśmie podczas rozruchu przenośnika,
- budowy modelu matematycznego przenośnika taśmowego oraz analizy zjawisk dynamicznych występujących podczas nieustalonych stanów jego pracy.

2. METODA BADAŃ

Do badań modułu sprężystości według PN-EN ISO 9856 [11] należy przygotować próbki o szerokości 50 mm

i długości 500 mm wycięte wzdłuż taśmy przenośnikowej. Próbkę poddawana jest obciążeniu, które zmienia się sinusoidalnie z częstotliwością $f = 0,1$ Hz w granicach 2–10% nominalnej wytrzymałości na rozciąganie K_r . Po 200 cyklach obciążeń na podstawie wykresu siła-wydłużenie odczytywana jest wartość wydłużenia trwałego Δl_p badanej próbki oraz wartość wydłużenia sprężystego Δl_e . Na rysunku poniżej pokazano przebieg pętli histerezy z zaznaczeniem odczytywanych wielkości.

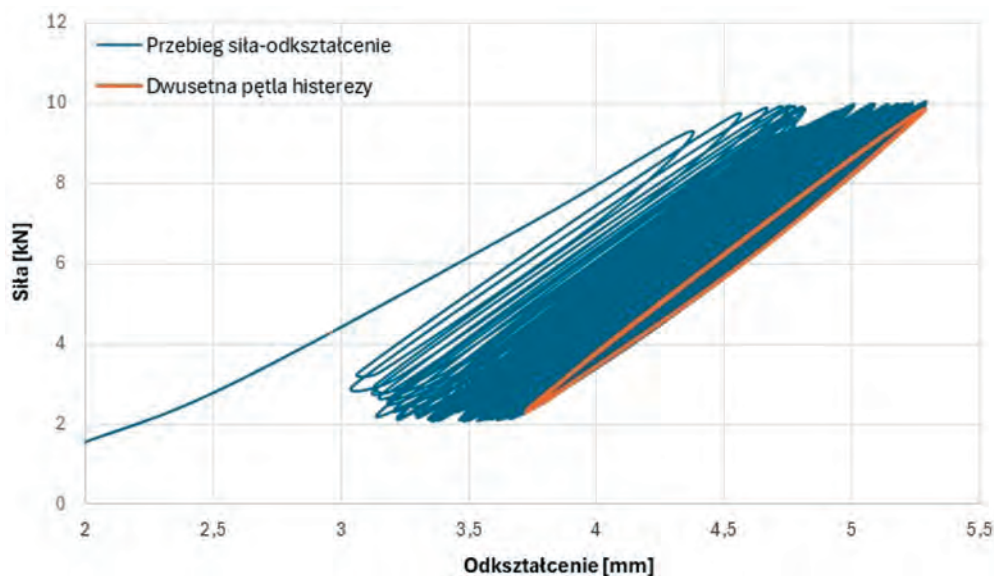
Moduł sprężystości E definiowany jako stosunek przyrostu naprężenia ΔF do wywołanego nim odkształcenia sprężystego taśmy Δl_e (rys. 3) obliczono ze wzoru:

$$E = \frac{\Delta F}{\epsilon_{\text{elast}}} \text{ [kN} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie ΔF [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$] – przyrost naprężenia w próbce wywołujący jej względne odkształcenie sprężyste:

$$\epsilon_{\text{elast}} = \frac{\Delta l_e}{l_o} [-] \quad (2)$$

gdzie l_o – początkowa długość odcinka odniesienia (równa 200 mm).



Rys. 3. Przebieg pętli histerezy na wykresie siła-odkształcenie

Polskie normy nie precyzują wymagań odnośnie do wydłużeń trwałych, podają jedynie wymagania co do wydłużeń przy obciążeniu roboczym i przy zerwaniu. Wydłużenie taśm poliestrowych przy obciążeniu równym 10% nominalnej wytrzymałości na rozciąganie K_r nie powinno przekroczyć 3,5%, zaś wydłużenie przy zerwaniu taśmy nie powinno być mniejsze niż 10% [2].

2.1. Stanowisko do badań modułu sprężystości taśm przenośnikowych

Standardowe badania modułu sprężystości taśm wykonuje się z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej o odpowiednim zakresie zadawanych sił [12]. Ze względu na czas wykonywania pojedynczego badania modułu sprężystości taśmy nie jest możliwe jego

zrealizowanie z wykorzystaniem standardowej maszyny wytrzymałościowej w innych temperaturach niż temperatura otoczenia. Dlatego badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego niewielkie wymiary pozwalają na umieszczenie w całości w komorze klimatycznej, w której można zadawać temperatury z zakresu od -30°C do $+50^{\circ}\text{C}$ [10, 11]. Jest to istotnie, gdyż zmiany temperatury wpływają w dużym stopniu na eksploatacyjne własności taśmy [5].

Stanowisko (rys. 4) wyposażone jest w siłownik pneumatyczny wprawiający w ruch okresowy dźwignię, do której zamocowana jest jednym końcem próbka taśmy. Drugi jej koniec zamocowany w szczękach łączy się z tensometrycznym czujnikiem siły, a następnie z ramą. Dodatkowo układ wyposażony jest w zawór proporcjonalny, który pozwala regulować wartość ciśnienia powietrza. Na próbce taśmy znajduje się czujnik odkształcenia rejestrujący wydłużenie próbki.



Rys. 4. Stanowisko do badań modułu sprężystości taśm w komorze klimatycznej

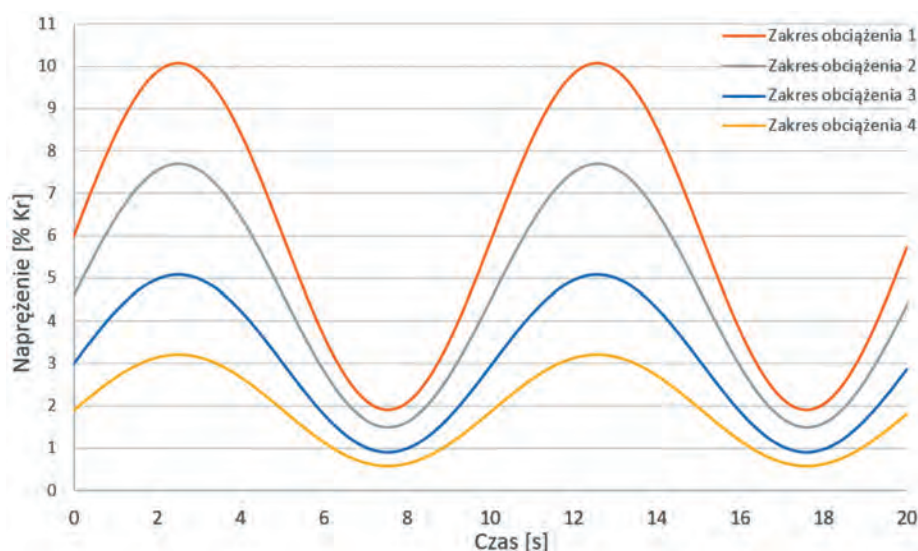
2.2. Warunki prowadzenia badań

Badania prowadzono w warunkach zgodnych z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN ISO 9856 [11] i oznaczono jako warunki odniesienia (zakres obciążenia 1) oraz w warunkach zmiennego zakresu obciążenia, a także w wysokiej temperaturze.

Do projektowania przenośników taśmowych, a w szczególności doboru taśmy zawsze należy dołożyć najwyższych starań. Dzięki temu urządzenie może pracować

przez długi okres, a koszty inwestycyjne nie są wygórowane [1, 2]. Często jednak zdarza się, że wskutek modyfikacji przenośnika taśma pracuje w niższym lub wyższym zakresie obciążenia. Może to wynikać z wydłużenia lub skrócenia trasy, zawilgocenia lub zapylecia bębna napędowego, zmiany ilości podawanego urobku.

Na rysunku 5 pokazano w formie graficznej cykliczne przebiegi zakresu obciążenia, jakim poddano próbki taśm.



Rys. 5. Przebiegi obciążenia zadawane podczas badań modułu sprężystości

Dla taśmy o wytrzymałości 2000 kN/m i szerokości 1000 mm standardowy zakres obciążenia, czyli 2–10% K_r wynosi 40–200 kN. Po przełożeniu tych wartości na próbkę o szerokości 50 mm zakres obciążenia wyniósł 2–10 kN (zakres obciążenia 1). Dla przyjętych obciążeń oznaczonych 2–4 zakres sił to odpowiednio: 1,6–8,0 kN, 1–5 kN oraz 0,7–3,0 kN. Dla obciążenia przekraczającego 10% K_r badań modułu sprężystości nie przeprowadzono.

Badania modułu sprężystości przeprowadzono w temperaturze otoczenia, czyli $22 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz w podwyższonej do $50 \pm 2^\circ\text{C}$. Temperatura 50°C nie przekracza zakresu stosowalności tkaninowych taśm przenośnikowych i jest nieznacznie większa od najwyższych temperatur, które odnotowuje się w podziemnych kopalniach, dlatego podczas badań przyjęto taką właściwą wartość.

3. BADANIA LABORATORYJNE MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI

Do badania wybrano dwie próbki nowych taśm o tej samej wytrzymałości nominalnej, lecz różnej budowie

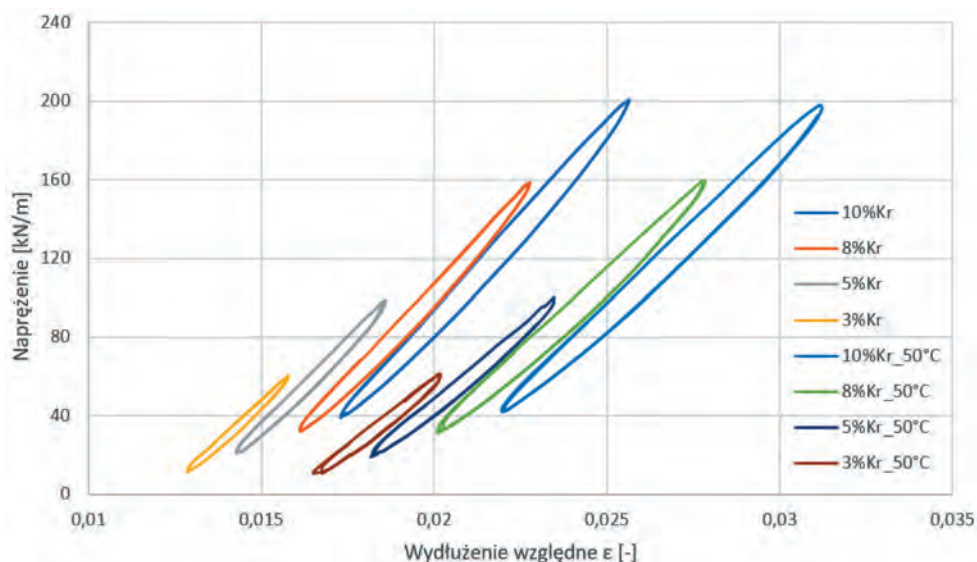
rdzenia, szerokość próbek wynosi 50 mm. Czas kondycjonowania w przyjętych temperaturach wynosił 8 godzin.

Badania dla każdego zakresu obciążenia oraz przyjętych temperatur wykonano trzykrotnie, określono wartości średnie oraz odchylenie standardowe. Analizie poddano dwusetne pętle histerezy naprężenia w funkcji wydłużenia sprężystego.

3.1. Taśma EP 2000

Próbka o oznaczeniu EP 2000 to taśma wieloprzeładowa o wytrzymałości 2000 kN/m, wyprodukowana z tkaniny poliestrowej wzdłuż nici osnowy i poliamidowej wzdłuż wątku. Taśma ma cztery przeładowki oraz gumowe okładki. Standardowy zakres temperatury jej stosowania wynosi od -25°C do $+60^\circ\text{C}$.

Na rysunku 6 zamieszczono zestawienie dwusetnych pętli histerezy otrzymanych podczas badań taśmy EP 2000 w przyjętych warunkach laboratoryjnych. Po lewej stronie wykresu znajdują się wyniki uzyskane podczas badań w temperaturze 22°C , natomiast po prawej stronie wyniki w podwyższonej temperaturze.



Rys. 6. Zestawienie dwusetych pętli histerezy dla taśmy EP 2000 we wszystkich przyjętych warunkach

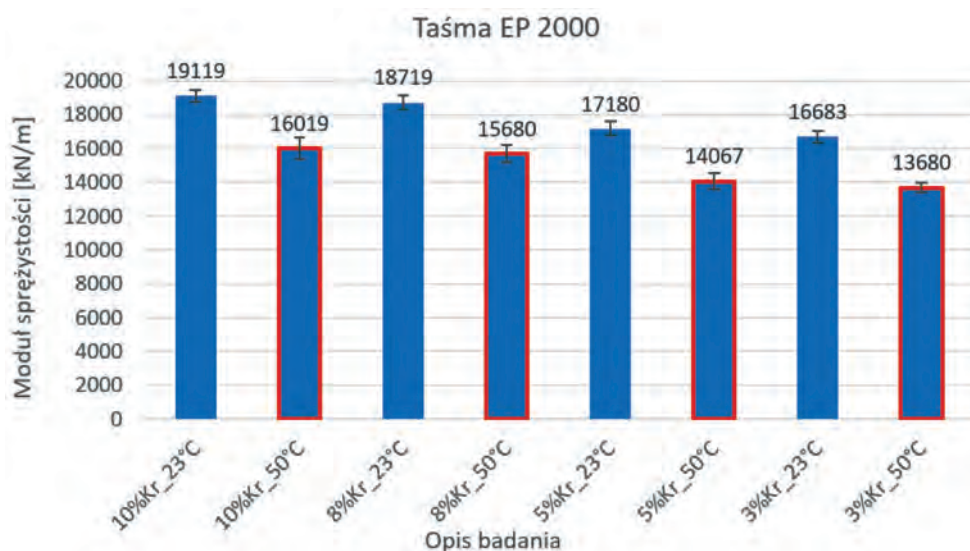
Porównując kształt i pochylenie pętli, można zauważyć nieco większe pochylenie pętli uzyskanych podczas badania w temperaturze 50°C, a także większe pole powierzchni tych pętli, co jest miarą większych strat energii podczas każdorazowego cyklu obciążenia.

Na wykresie słupkowym (rys. 7) zestawiono średnie wartości modułu sprężystości dla wszystkich przyjętych warunków badania. Zaznaczono także wartości odchyłek otrzymanych jako odchylenie standardowe. Czerwona obwódka słupków oznacza badanie w temperaturze 50°C.

Dla zakresu obciążenia oznaczonego jako 1 i temperatury 22°C osiągnięto maksymalną wartość modułu sprężystości taśmy EP 2000 wynoszącą $19\,119 \pm 336$ kN/m.

W przypadku tego samego zakresu obciążenia, lecz podwyższonej do 50°C temperatury wartość modułu wynosi $16\,019 \pm 635$ kN/m. Badanie modułu sprężystości prowadzone w temperaturze 50°C powoduje w tym przypadku zmniejszenie jego wartości o 16%.

Wartość modułu sprężystości taśmy EP 2000 badana dla skrajnie niskich obciążeń (obciążenie 4) wynosi $16\,680$ kN/m, co stanowi zmniejszenie w stosunku do warunków odniesienia o 13%. Jednak przy dodatkowym uwzględnieniu wysokiej temperatury (50°C) wartość modułu wynosi $13\,680 \pm 305$ kN/m, co oznacza spadek o ponad 28% w stosunku do warunków odniesienia.



Rys. 7. Zestawienie średnich wartości modułu sprężystości dla taśmy EP 2000

Z tabeli 1, w której zawarto średnie wartości modułów sprężystości taśmy EP 2000, wynika, że badanie w podwyższonej temperaturze obniża wartość modułu sprężystości

o 16–18% w stosunku do wartości uzyskanej w temperaturze 22°C. Większy wpływ na zmianę modułu sprężystości taśmy EP 2000 ma temperatura niż obciążenie.

Tabela 1

Wartości modułu sprężystości taśmy EP 2000 badane w przyjętych warunkach

	Zakres obciążenia			
	2–10% K_r	1,6–8% K_r	1–5% K_r	0,7–3% K_r
	Wartość modułu sprężystości [kN/m]			
22°C	19 119 ± 335	18 719 ± 391	17 180 ± 428	16 683 ± 350
50°C	16 019 ± 631	15 680 ± 515	14 067 ± 463	13 680 ± 303
Zmiana procentowa	16%	16%	18%	18%

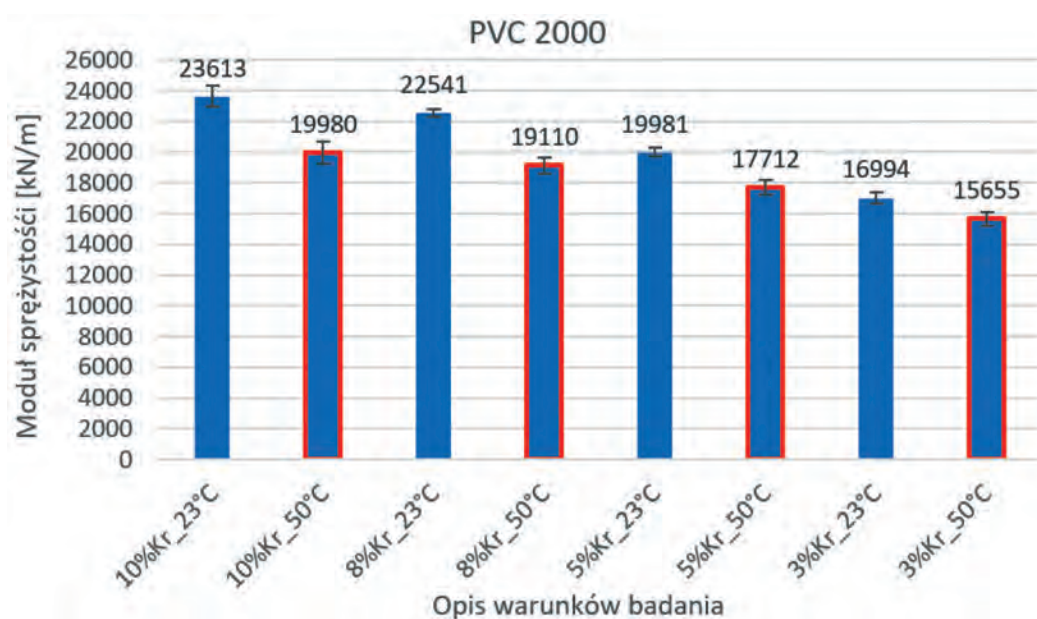
3.2. Taśma PVC 2000

Próbka o oznaczeniu PVC 2000 to taśma jedno-przekładkowa o wytrzymałości 2000 kN/m której rdzeń zbudowany został z nici poliestrowych w kierunku osnowy i poliamidowych wzdłuż wątku. Taśma posiada rdzeń jednolicie tkany przesycony polichlorkiem winylu, oraz gumowe okładki. Standardowy zakres temperatury jej stosowania wynosi od 0°C do +50°C.

Dla taśmy PVC 2000 wykonano ten sam zakres badań. Na wykresie słupkowym zestawiono średnie wartości modułu sprężystości dla wszystkich przyjętych

warunków badania taśmy PVC 2000. Tak jak dla poprzedniej taśmy zaznaczono wartości odchylenia standardowego, czerwoną obwiednią słupków wyróżniono badanie w temperaturze 50°C.

Dla zakresu obciążenia 1 i temperatury 22°C osiągnięto maksymalną wartość modułu sprężystości taśmy PVC 2000, wynoszącą 23 613 ± 692 kN/m. Dla tego samego zakresu obciążenia, lecz temperatury podwyższonej do 50°C wartość modułu wynosi 19 980 ± 734 kN/m. Badanie modułu sprężystości prowadzone w temperaturze 50°C powoduje zmniejszenie jego wartości o 15%.



Rys. 8. Zestawienie średnich wartości modułu sprężystości dla taśmy PVC 2000

Wartość modułu sprężystości taśmy PVC 2000 badana dla skrajnie niskich obciążeń (obciążenie 4) wynosi 16 994 ± 380 kN/m, co stanowi zmniejszenie w stosunku do warunków odniesienia o 28%. Po uwzględnieniu niskiego obciążenia (obciążenie 4) oraz wysokiej temperatury (50°C) wartość modułu wynosi 15 955 ± 320 kN/m,

co oznacza spadek o ponad 33% w stosunku do warunków odniesienia.

Z tabeli 2, w której zawarto średnie wartości modułów sprężystości taśmy PVC 2000, wynika, że badanie w podwyższonej temperaturze obniża wartość modułu sprężystości o 8–15% w stosunku do wartości uzyskanej w temperaturze 22°C.

Tabela 2
Wartości modułu sprężystości taśmy PVC 2000 badane w przyjętych warunkach

	Zakres obciążenia			
	2–10% K_r	1,6–8% K_r	1–5% K_r	0,7–3% K_r
	Wartość modułu sprężystości [kN/m]			
22°C	23 613 ± 692	22 541 ± 223	19 981 ± 299	16 494 ± 380
50°C	19 980 ± 734	19 110 ± 504	17 712 ± 507	15 955 ± 320
Zmiana procentowa	15%	15%	11%	8%

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

- 1) Wykonanie miarodajnych badań modułu sprężystości taśm przenośnikowych w niskich lub wysokich temperaturach jest możliwe jedynie przy wykorzystaniu stanowiska, które wraz z próbką można zamknąć w komorze klimatycznej na cały okres badań właściwych.
- 2) W zależności od zakresu obciążenia moduł sprężystości taśmy jednoprzekładowej jednolicie tkanej ($E = 23\,613 \pm 692$ kN/m) jest większy o 13–19% niż moduł sprężystości taśmy wieloprzekładowej ($E = 19\,119 \pm 336$ kN/m).
- 3) Badanie taśmy w wysokiej temperaturze powoduje zmniejszenie jej modułu sprężystości. Dla taśmy EP2000 wartość modułu maleje w zakresie 16–18%, natomiast dla taśmy PVC 2000 o 8–15%.
- 4) Uwzględniając skrajnie niskie obciążenie oraz wysoką temperaturę (50°C), wartość modułu sprężystości może się zmniejszyć dla badanych taśm o 28–33% w stosunku do warunków odniesienia.

Literatura

- [1] Gładysiewicz L.: *Przenośniki taśmowe. Teoria i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [2] Żur T., Hardygóra M.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1996.
- [3] Drenda J.: *Ocena klimatycznych warunków pracy górników w polskich kopalniach węgla kamiennego i rudy miedzi*. Górnictwo i Geologia 2012, 7, 3, 19–35.
- [4] Szewczyk J.: *Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermicznej w Polsce*. Przegląd Geologiczny 2010, 58, 7, 566–573.
- [5] Pypno C.: *Wpływ temperatury na własności mechaniczne taśm przenośnikowych*. Politechnika Śląska, Katowice 1994 [praca doktorska].
- [6] Zarzycki J.: *Analiza wpływu temperatury na własności reologiczne taśm przenośnikowych*. Cuprum 2014, 3, 33–43.
- [7] Zarzycki J.: *Badania własności reologicznych taśm przenośnikowych w ujemnych temperaturach*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2013, 3, 13–16.
- [8] Karolewski B., Ligocki P.: *Modelling of long belt conveyors*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014, 16, 2, 179–187.
- [9] Kuliniowski P.: *Simulation method of designing and selecting tensioning systems for mining belt conveyors*. Archives of Mining Sciences 2014, 59, 1, 123–138, <https://doi.org/10.2478/amsc-2014-0009>.
- [10] Sakharwade G.S., Shubharata Nagpal: *Analysis of Transient Belt Stretch for Horizontal and Inclined Belt Conveyor System*. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences 2019, 4, 5, 1169–1179.
- [11] PN-EN ISO 9856: 2005. *Taśmy przenośnikowe – Oznaczanie wydłużenia sprężystego i wydłużenia trwałego oraz obliczanie modułu sprężystości*.
- [12] Woźniak D., Sawicki W.: *Doświadczenia z badań laboratoryjnych modułu sprężystości taśm przenośnikowych przy cyklicznym rozciąganiu*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2008, 2, 21, 6–10.

dr inż. JACEK ZARZYCKI
jacek.zarzycki@agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków