<section-header><text><text><text>

Marek ROTKEGEL

Powłoki elastyczne jako opinka obudowy wyrobisk korytarzowych - możliwości zastosowania KATOWICE 2003

Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa STUDIA – ROZPRAWY – MONOGRAFIE

Nr 853

Marek ROTKEGEL

Powłoki elastyczne jako opinka obudowy wyrobisk korytarzowych – możliwości zastosowania

ELASTIC COATS AS LAGGING OF THE MINE ROADWAY SUPPORTS – POSSIBILITIES OF APPLICATION

KATOWICE 2003

Rada Programowa ds. Wydawnictw: prof. dr hab. inż. Jakub Siemek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźla, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. inż. Joanna Krajewska Pinińska, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś, prof. dr hab. inż. Janusz W. Wandrasz, prof. dr hab. inż. Piotr Wolański

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński (przewodniczący), doc. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka, prof. dr hab. inż. Jan Hankus, prof. dr hab. inż. Władysław Konopko, prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek, doc. dr hab. Kazimierz Lebecki, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka, prof. dr hab. Jerzy Sablik, doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz

> Przygotowanie do druku i druk: Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych Głównego Instytutu Górnictwa 40-166 Katowice, Pl. Gwarków 1

> > Recenzent: prof. dr hab. inż. Zenon Szczepaniak

Redakcja wydawnicza Małgorzata Kuśmirek

Redakcja techniczna i korekta Małgorzata Kuśmirek

ISSN 1230-2643

Printed in Poland

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Katowice, GIG 2003. Wyd. 1. Nakład 100 egz. Ark. wyd. 2,9. Format B5. Wpłynęło do redakcji: 11.04.03. Podpisano do druku: 29.10.03. Druk ukończono: 28.11.03.

Nr 853. Cena 40,00 zł

Druk okładki i oprawę wykonał Zakład Poligraficzny "Węglogryf", Katowice

1. OPINKA OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH	7
2. POWŁOKA TEKFLEX	11
3. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI POWŁOKI MODELOWEJ	14
3.1. Próba rozciągania	14
3.1.1. Próba w warunkach laboratoryjnych	14
3.1.2. Próba analityczna	
3.1.3. Symulacja komputerowa	
3.2. Próba "skrzynkowa"	19
3.2.1. Próba fizyczna	
3.2.2. Symulacja komputerowa próby "skrzynkowej"	
3.3. Wytrzymałość powłoki badanej w układzie siatki okładzinowej	24
3.4. Kryteria wynikające z analiz	29
4. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI POWŁOK ELASTYCZNYCH	
W WYROBISKU	36
4.1. Badania modelowe powłoki nałożonej na wyłom	41
4.2. Badania modelowe "wzmocnienia" skał wyłomu	44
4.3. Badania i obserwacje dołowe	47
4.4. Wyniki analiz	52
PODSUMOWANIE	53
LITERATURA	54

STRESZCZENIE

Poszukiwania nowych bezpieczniejszych i tańszych rozwiązań obudowy wyrobisk korytarzowych skłaniają do poświęcenia uwagi także opince, która jest jej istotnym elementem. Zabezpiecza ona wyrobisko przed opadaniem drobnych odłamków skał, a tym samym przenosi na odrzwia ciężar zruszonej strefy wokół wyrobiska. Brak opinki obudowy lub jej niewłaściwe wykonanie jest zagrożeniem dla pracujących załóg i funkcjonowania wyrobiska, a także powodem powstawania pustek niekorzystnie wpływających na nośność i stabilizację odrzwi.

Istnieją nowoczesne technologie i materiały, które, przy spełnieniu pewnych kryteriów, mogą zastąpić ręcznie układane okładziny, przyczyniając się tym samym do podniesienia efektywności prac związanych z zabezpieczaniem wyrobisk przy jednoczesnym podniesieniu lub zachowaniu dotychczasowego poziomu bezpieczeństwa. Materiałami tymi mogą być powłoki elastyczne nakładane natryskowo na wyłom.

Podstawowa rola powłoki elastycznej, szczelnie przylegającej do wyłomu, polega na spowalnianiu lub wręcz zatrzymywaniu procesu odspajania skał, propagacji szczelin i pęknięć. Jak wykazały badania modelowe nawet bardzo elastyczna powłoka znacznie zmniejsza ugięcie wyłomu, zabezpieczając go tym samym przed złamaniem i skruszeniem. Wpływa na to już samo istnienie elastycznej dobrze przylegającej warstwy "zamykającej" szczeliny i pęknięcia. Powstają układy – mostki, które tworzą ramy o znacznie lepszych parametrach wytrzymałościowych niż parametry skał poprzecinanych siatką szczelin.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie napylanej powłoki jest uzasadnione w przypadkach, gdy skały wyłomu są mocno spękane, odspojone i pokruszone. Ponadto przedstawione w opracowaniu wyniki badań pozwalają na określenie warunków, jakie muszą spełniać powłoki elastyczne, aby mogły bezpiecznie i ekonomicznie zastąpić opinkę. Jednym z nich jest możliwość zastosowania danego materiału w wyrobisku górniczym, z czym wiąże się warunek niepalności, niewybuchowości oraz nietoksyczności zarówno podczas nakładania, jak i w czasie właściwego użytkowania. Kolejny warunek to odpowiedni sposób przygotowania powierzchni do napylania i przygotowania napylanego materiału. Ponadto, proces oczyszczania wyłomu nie może być zbyt pracochłonny. Bardzo istotnymi parametrami ze względów technologicznych są: lepkość przygotowanego materiału i szybkość jego wiązania. Wskazane jest, aby parametry te miały duże wartości, wtedy materiał będzie lepiej przylegał do skał wyłomu oraz możliwe będzie nałożenie grubszej warstwy. Nie bez znaczenia są także parametry wytrzymałościowe i sztywnościowe.

Słowa kluczowe: wyrobisko korytarzowe; obudowa; obudowa chodnikowa; opinka; powłoka elastyczna; bezpieczeństwo pracy.

ABSTRACT

Searching for new, safer and cheaper solutions of mine roadway supports prompt also to pay attention to lagging, being its important element. It protects the working against the fall of fine rock fragments, and thereby transfers to the door-frame the weight of the loose zone around this working. The lack of the support lagging, or its improper manufacture, constitute a hazard to the working crew and to functioning of the working. It is also a cause of origination of voids, which adversely influence both the load-bearing capacity and stabilisation of the door-frame.

There are modern technologies and materials, which after certain criteria have been fulfilled, can replace the manually laid linings, thereby contributing to increasing the effectiveness of the work connected with the protection of workings, with simultaneous increasing or keeping the current level of safety. These materials can be the elastic coats put by spraying onto the breakout.

The principal role of the elastic coat, firmly adherent to the breakout, relies on slowing down, or simply stopping the process of loosening of the rock, propagation of fissures and cracks. As the modelling studies have shown, even a very flexible coat considerably reduces the bend of the breakout, thereby protecting against breaking and fragmentation. This is affected just by the existence of an elastic, closely adjacent layer, which 'closes' the fissures and cracks. The bridging systems originate which make the frames with much better mechanical strength parameters than the parameters of the rock cut across by the net of fissures.

On the basis of the results obtained, one can say that the application of a sprayed coat is justified in the cases when the rock of the breakout is significantly cracked, loosened and fragmented. In addition, the results presented in the study make possible to define the conditions that must be met by the elastic coats to be able to replace, safely and economically, the lagging.

One of them is the possibility to apply a given material in a mine working, which is conditioned by non-flammability, explosion-proofness and non-toxicity both during its placement and proper utilisation. The next condition is an adequate way of preparation of the surface for spraying, and preparation of the material to be sprayed. Moreover, the process of cleaning of the breakout must not be too labour-consuming. For technological reasons, very important parameters are here: viscosity of the prepared material and its rate of setting. It is advisable for these parameters to have high values. In this case the material will be better attached to the rock of the breakout, and it will be possible to place a thicker layer. The mechanical strength and stiffness parameters are also not out of value.

Keywords: mine gallery; supports; roadway supports; lagging; elastic coat; work safety.

1. OPINKA OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH

Istotnym elementem obudowy jest opinka, która stanowi zabezpieczenie wyrobiska przed opadaniem drobnych odłamków skał, a tym samym przenosi na odrzwia ciężar zruszonej strefy wokół wyrobiska. Brak opinki obudowy lub jej niewłaściwe wykonanie jest zagrożeniem dla pracujących załóg i funkcjonowania wyrobiska, a także powodem powstawania pustek niekorzystnie wpływających na nośność i stabilizację odrzwi. Powstające pustki i wyrwy w wyłomie skalnym wentylacji wyrobisk. Moga także stwarzać zakłócaja system poważne niebezpieczeństwo wybuchu gromadzącego się w nich metanu. Do wykonania opinki najczęściej są stosowane okładziny żelbetowe, okładziny z blachy stalowej profilowanej oraz siatki zgrzewane. Okładziny te są układane w odpowiedni sposób na całym obwodzie odrzwi od strony wyłomu. Standardowe długości produkowanych okładzin umożliwiają ich zabudowę na odrzwiach o rozstawach 0,5, 0,75 i 1,0.

Bardzo popularne są okładziny żelbetowe, najczęściej o przekroju poprzecznym prostokątnym. Okładziny te mogą być zakładane na odrzwia w zależności od warunków geologiczno-górniczych panujących w otoczeniu wyrobiska, płasko ażurowo lub rębem ażurowo. Na rysunku 1 przedstawiono sposoby zakładania okładzin żelbetowych.



Rys. 1. Sposoby zakładania okładzin żelbetowych **Fig. 1.** Methods of mounting the reinforced concrete linings

Nieco rzadziej są stosowane okładziny z blachy stalowej. Mają one różną szerokość i długość dostosowaną do rozstawu odrzwi, a także wzmocnienia w postaci przetłoczeń, zwiększających ich wytrzymałość na zginanie. Grubość blachy stosowanej do wykonania okładziny wynosi 3,0–5,0 mm. Okładziny te, podobnie jak żelbetowe, pracują na zginanie. W celu doboru typu okładziny oraz sposobu jej zakładania należy posłużyć się wartościami wytrzymałości na zginanie, podanymi w dokumentacji techniczno-ruchowej. Na rysunku 2 przedstawiono najczęściej stosowane okładziny z blachy stalowej, natomiast na fotografii 1 opinkę wykonaną z tych okładzin.



Rys. 2. Najczęściej stosowane okładziny z blachy stalowej Fig. 2. Most often used steel-sheet linings



Fot. 1. Opinka wykonana z okładzin z blach stalowych Photo 1. Lagging made of steel sheet lining

Obecnie najczęściej są stosowane okładziny siatkowe zgrzewane. Należy przede wszystkim wymienić siatki zaczepowe, łańcuchowe i zaczepowo-łańcuchowe. Na fotografii 2 przedstawiono opinkę wykonaną z siatek. Siatki zgrzewane produkuje się w dwóch odmianach:

- lekkie do współpracy z obudową z kształtowników V21 i V25,
- ciężkie do współpracy z obudową kształtowników V29, V32 i V36.



Fot. 2. Opinka wykonana z siatek zaczepowych Photo 2. Lagging made of catching nets

Okładziny siatkowe, zwłaszcza zgrzewane zaczepowe, pod względem budowy, sposobu podparcia i obciążenia stanowią konstrukcję zbliżoną do cięgien. Konstrukcje takie, mimo wielu zalet, mają także wady, na przykład pojawiają się trudności z przeniesieniem siły z cięgien na podpory (w tym przypadku kołnierze kształtownika V). W związku z tym często stosuje się podwójne zaczepy siatek, jak to pokazano na rysunku 3. Wadą są także trudności związane z obliczaniem konstrukcji cięgnowych. Jest to spowodowane między innymi nieliniowościami [7].



Rys. 3. Zaczepy okładzin siatkowych zaczepowych (z lewej zaczep pojedynczy, z prawej zaczep podwójny) Fig. 3. Hooks of catching net linings (single hook – left, double hook – right)

Jakościową ocenę opinki z siatek zgrzewanych określa się jako nośność opinki szerokości 0,5 m, przy rozstawie odrzwi równym 1,0 m, zakładając równomierne jej obciążenie w połowie rozstawu odrzwi. Szczegółowo przebieg badań reguluje norma PN-G-15050. Okładziny siatkowe zgrzewane muszą posiadać dopuszczenie Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego do stosowania w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.

Prowadzone poszukiwania nowych bezpieczniejszych i tańszych rozwiązań obudowy wyrobisk korytarzowych skłaniają także do poświęcenia uwagi opince obudowy. Istnieją nowoczesne technologie i materiały, które przy spełnieniu pewnych kryteriów, mogą zastąpić ręcznie układane okładziny, przyczyniając się tym samym do podniesienia efektywności prac związanych z zabezpieczaniem wyrobisk przy jednoczesnym podniesieniu lub zachowaniu dotychczasowego poziomu bezpieczeństwa. Materiałami tymi mogą być powłoki elastyczne nakładane natryskowo na wyłom.

2. POWŁOKA TEKFLEX

Jedną z powłok elastycznych przeznaczonych do stosowania w górnictwie jest materiał o nazwie handlowej tekflex. Wyniki badań tego materiału stały się podstawą do rozszerzenia analiz na powłoki o innych parametrach.

Tekflex to mineralno-organiczny torkret typu elastycznej membrany, z którego wykonuje się powłoki o szerokim zastosowaniu w podziemnych wyrobiskach górniczych [16]. Podstawowymi cechami różniącymi go od klasycznych torkretów są: duża elastyczność oraz niewielka grubość nakładanej warstwy. Są produkowane dwa rodzaje tekflexu: jedno- i dwukomponentowy. Jednokomponentowy jest mieszaniną cementów z proszkowym polimerem oraz z modyfikatorami. Proszek ten miesza się z wodą w stosunku wagowym 1 : 2,63. Dwukomponentowy jest mieszaniną ciekłego komponentu A, będącego wodną dyspersją polimerową, i komponentu B (proszek na bazie cementów z dodatkiem modyfikatorów) w stosunku wagowym 2 : 1. Oba rodzaje po wymieszaniu wykazują podobną reologię oraz czas wiązania, mają ten sam skład chemiczny, a nakładanie powłoki odbywa się przy pomocy tego samego urządzenia. Na fotografii 3 przedstawiono powłokę tekflex nałożoną na wyłom.



Fot. 3. Powłoka tekflex nałożona na wyłom Photo 3. Tekflex coat laid on the breakout

Powłoka typu tekflex, jak wcześniej wspomniano, charakteryzuje się dużą elastycznością. W tablicy 1 przedstawiono wybrane parametry tekflexu w warunkach laboratoryjnych – w temperaturze 20°C i wilgotności względnej około 50%. Jak podaje producent, w warunkach rzeczywistych parametry te mogą ulec zmianie.

Parametr	Jednostka	Wartość
Gęstość	kg/m ³	1 150–1 260
Grubość nakładanej warstwy	mm	2–6
Lepkość w <i>t</i> = 20°C	MPa · s	70 000–100 000
Czas żelowania w <i>t</i> = 20°C	min	30–60
Koniec wiązania w <i>t</i> = 20°C	h	<4
Wydajność przy grubości powłoki 4 mm	m²/dm³	ok. 0,25
Wytrzymałość na rozrywanie po 8 godz.	MPa	>1
Wydłużenie względne przy zerwaniu po 8 godz.	%	50–200
Wytrzymałość na rozrywanie po 28 dniach	MPa	>2,5 (średnio 3,5–4)
Wydłużenie względne przy zerwaniu po 28 dniach	%	>20 (średnio 40–60)
Inne	-	niepalny, nietoksyczny

Tablica 1. Właściwości tekflexu [16]

Przedstawione wartości parametrów wskazują na wiele zalet powłok tekflex, do których należą [16]:

- duża wydajność z jednej szarży materiału podawanego agregatem TX-1 (około 100 litrów) można uzyskać powłokę na powierzchni około 25 m²;
- proste i szybkie nałożenie szczelnej, dokładnie wypełniającej wszelkie nierówności powłoki, dzięki zastosowaniu specjalnej dyszy rozpylającej;
- odpowiednia reologia, dzięki której, prawidłowo nałożony materiał nie spływa z ociosów i ze stropu;
- elastyczność nie występują rysy i spękania, charakterystyczne dla klasycznych torkretów mineralnych – powłoka poddaje się ruchom górotworu, zachowując szczelność.

Zgodnie z dopuszczeniem Prezesa WUG tekflex może być stosowany do:

- izolowania ociosów i stropu przed migracją gazów i wody oraz wietrzeniem skał,
- uszczelniania tam izolacyjnych,
- zabezpieczania antykorozyjnego metalowych elementów obudowy.

Zgodnie z wymienionym dopuszczeniem tekflex może być także stosowany próbnie jako opinka obudowy wyrobisk korytarzowych. Badania takiego zastosowania tekflexu są prowadzone obecnie w kopalni "Chwałowice" i "Bogdanka".

Nakładanie tekflexu polega na mokrym natryskiwaniu gotowej mieszanki przy zastosowaniu specjalnej dyszy rozpylającej, zasilanej sprężonym powietrzem. W celu uzyskania odpowiedniego efektu materiał powinien być natryskiwany za pomocą specjalnego agregatu pompowego, na przykład TX-1, który posiada odpowiednie dopuszczenie do stosowania w zakładach górniczych. Agregat składa się z mieszarki, w której odbywa się mieszanie komponentów (typ dwukomponentowy) lub proszku z wodą (typ jednokomponentowy), pompy ślimakowej do podawania wymieszanego materiału do dyszy oraz specjalnej dyszy rozpylającej zasilanej sprężonym powietrzem. Fotografia 4 przedstawia agregat w czasie pracy.



Fot. 4. Agregat do nakładania powłok elastycznych Photo 4. Machine for laying elastic coats

Przed przystąpieniem do nakładania tekflexu należy odpowiednio oczyścić powierzchnię przeznaczoną do natryskiwania, używając wody pod ciśnieniem lub sprężonego powietrza. Agregat pompowy wraz z wężami i dyszą powinien być czysty, a wszystkie połączenia powinny być szczelne. Przed użyciem mieszalnik agregatu należy napełnić wodą i przeprowadzić próbę pompowania i rozpylania aż do całkowitego jego opróżnienia. Następnie do mieszalnika podaje się komponenty A i B lub wodę i proszek. Po dokładnym wymieszaniu materiał powinien być jednolity i mieć właściwą konsystencję. Tak przygotowany materiał jest gotowy do nakładania [5], które prowadzi się w odległości 1–2 m od natryskiwanej powierzchni. Więcej szczegółów dotyczących nakładania powłok z tekflexu zawiera instrukcja [5].

KRYTERIA WYNIKAJĄCE Z WŁASNOŚCI FIZYKOCHEMICZNYCH POWŁOKI

Przy nakładaniu powłok natryskiwanych czas wiązania, lepkość, przyczepność oraz gęstość determinują maksymalną grubość nałożonej warstwy. W przypadku powłok tekflex producent zaleca, aby grubość nakładanej warstwy wynosiła 2–6 mm. Zwiększenie grubości do ponad 6 mm może spowodować słabsze przyleganie, spływanie materiału i późniejsze odspajanie od wyłomu. Parametr ten najłatwiej można określić w czasie prób nakładania. Za dopuszczalną należy przyjąć taką grubość warstwy, przy której materiał nie spływa z zabezpieczanej powierzchni.

3. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI POWŁOKI MODELOWEJ

Badania przeprowadzono w dwóch etapach, najpierw badano powłokę elastyczną typu tekflex o parametrach wyznaczonych w czasie badań stanowiskowych, a następnie – powłoki o innych parametrach wytrzymałościowych.

3.1. Próba rozciągania

Próba rozciągania jest podstawową próbą wytrzymałościową materiałów konstrukcyjnych. Pozwala ona w sposób prosty i jednoznaczny określić podstawowe parametry badanego materiału. Parametrami tymi są charakterystyki materiałowe w układzie obciążenie w funkcji deformacji. Uwzględniając długość próbki oraz jej przekrój można odnieść te charakterystyki do układu naprężenie – odkształcenie. Na podstawie uzyskanych wykresów określa się wytrzymałość na rozciąganie, moduł sztywności wzdłużnej, odkształcenia względne itp. W przypadku materiałów metalowych próbę przeprowadza się zgodnie z normą PN-91/H-04310. W badaniach i analizach powłok elastycznych oparto się na normie ASTM D 638-91 [1], określającej warunki badania tworzyw sztucznych.

3.1.1. Próba w warunkach laboratoryjnych

Próba rozciągania została przeprowadzona w Głównym Instytucie Górnictwa w Centralnym Laboratorium Badań Rur z Tworzyw Sztucznych [15]. Z materiału rodzimego przygotowano próbki w przybliżeniu odpowiadające wymiarom próbki I określonej normą ASTM D 638-91. Próbkę taką przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Próbka I według ASTM D 638-91 (długość pomiarowa 50±0,25 mm) **Fig. 4.** Sample I in accordance with ASTM D 638-91 (measurement length 50±0.25 mm)

Przeprowadzono pięć prób. Z każdej próby uzyskano charakterystykę materiału tekflex. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki wszystkich przebadanych próbek, natomiast w tablicy 2 – wyniki poszczególnych prób.



Rys. 5. Wykresy rozciągania próbek tekflexu [1, 15] **Fig. 5.** Diagrams of tensioning of tekflex samples [1, 15]

Nr	Wymiary początkowe próbki, mm		owe Wymiary próbki po zerwaniu, mm		próbki po Siła iu, mm zrywająca		Wytrzymałość n MP	a rozciąganie a	Wydłu- żenie
próbki	szerokość	grubość	szerokość	grubość	N próbki, m	próbki, mm ²	teoretyczna	rzeczywista	względne %
1	12,83	4,60	12,48	4,40	222	59,02	3,76	4,04	38
2	13,04	4,40	12,86	4,40	208	57,38	3,63	3,68	40
3	12,68	4,40	12,33	4,10	198	55,79	3,55	3,92	42
4	12,72	3,90	12,47	3,72	178	49,61	3,59	3,84	50
5	13,02	3,50	12,80	3,42	174	45,57	3,82	3,97	38

Tablica 2. Wyniki prób wytrzymałościowych [15]

3.1.2. Próba analityczna

Przy założeniu, że są znane charakterystyki oraz przyjęciu biliniowego modelu materiału, powtórzenie prób rozciągania w sposób analityczny nie przedstawia większych problemów. Przyjęty model materiału jest widoczny na rysunku 6.



 Rys. 6. Biliniowy model materiału powłoki w układzie siła – odkształcenie (po lewej) i w układzie naprężenie – odkształcenie względne (po prawej)
 Fig. 6. Bilinear model of the coat material in the systems: force – strain (left), and stress – relative strain (right)

Korzystając z prawa Hooke'a można wyrazić zależność odkształceń próbki od jej obciążenia:

• dla pierwszej linii charakterystyki

$$F \le F_1 \qquad \Delta L = \frac{FL_0}{EA} \tag{1}$$

• dla drugiej linii charakterystyki

$$F > F_1$$
 $\Delta L = \frac{F_1 L_0}{EA} + \frac{(F - F_1)L_0}{E_T A}$ (2)

gdzie:

 ΔL – przyrost długości,

L₀ – długość początkowa próbki,

A – pole przekroju poprzecznego próbki,

E – moduł Younga odpowiadający pierwszej linii charakterystyki,

 E_T – moduł Younga odpowiadający drugiej linii charakterystyki,

F – siła rozciągająca próbkę,

 F_1 – obciążenie odpowiadające punktowi przecięcia pierwszej i drugiej linii charakterystyki.

3.1.3. Symulacja komputerowa

Modelowanie badań wytrzymałościowych miało na celu porównanie rzeczywistego zachowania się próbek z tworzywa tekflex z ich komputerowym modelem. Analizę przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych, wykorzystując program COSMOS/M z modułem do analizy nieliniowej – NSTAR. Dla potrzeb analizy z elementów 2D zbudowano komputerowy model rozciąganej

próbki. Model miał kształt i wymiary próbki typu I według normy ASTM D 638-91 [1], zgodnie z którą wcześniej przeprowadzono badania wytrzymałościowe tworzywa tekflex [15]. Dane uzyskane z badań laboratoryjnych wykorzystano do zadania odpowiednich parametrów materiałowych, przy czym analizę ograniczono do pierwszej próby [15]. Z wykresu rozciągania tej próby określono podstawowe parametry materiałowe i wyznaczono wyidealizowaną charakterystykę (rys. 6).

Moduły Younga analizowanej powłoki wynoszą:

- dla pierwszej linii charakterystyki (naprężenie 0-3,67 MPa) E = 73,31 MPa,
- dla drugiej linii charakterystyki (naprężenie 3,67–3,80 MPa) $E_T = 0,51$ MPa.

Symulację przeprowadzono z uwzględnieniem nieliniowości, z której wynika jej iteracyjny przebieg – program automatycznie kontroluje w jakim stanie (pierwsza czy druga linia charakterystyki) znajdują się poszczególne elementy modelu. Dla każdego z 12 kroków analizy rejestrowano obciążenia i odkształcenia. Pozwoliło to na porównanie charakterystyki wyznaczonej w czasie badań stanowiskowych (próby rozciągania) z charakterystyką uzyskaną w wyniku symulacji komputerowej. Porównanie obu charakterystyk oraz współrzędne zarejestrowanych punktów przedstawiono na rysunku 7, na którym zaznaczono kolejne kroki obliczeń.

Rys. 7. Porównanie charakterystyk i współrzędne punktów pomiarowych **Fig. 7.** Comparison of the characteristics and co-ordinates of the measurement points

Kompletną symulację próby rozciągania (rozkład naprężeń i przemieszczenie końca) w kolejnych krokach obliczeń przedstawiono na rysunku 8.

Z przedstawionych map naprężeń oraz wykresu wynika, że proces "płynięcia" próbki rozpoczyna się w 8. kroku obliczeniowym (przeskok niektórych elementów na drugą linię charakterystyki). W dalszych krokach obejmuje całą zasadniczą część próbki i przy niewielkim wzroście obciążenia, wyraźniej niż poprzednio, wzrasta

wydłużenie. Maksymalne obciążenie, wyznaczone w czasie badań stanowiskowych (F = 222 N), w komputerowej symulacji występuje w 11. kroku obliczeniowym. Duża zgodność charakterystyk (rzeczywistej i numerycznej) świadczy o przyjęciu właściwych parametrów materiałowych.

3.2. Próba "skrzynkowa"

3.2.1. Próba fizyczna

Próba skrzynkowa jest próbą wytrzymałości powłoki elastycznej zamykającej ramę od strony dna. W czasie próby powłoka jest obciążana na całej powierzchni ciśnieniem pochodzącym od ciężaru masy skalnej wypełniającej ramę.

Początkowo ramę o wymiarach $1,0 \times 1,0$ m wypełnia się masą skalną o założonym ciężarze. Po odpowiednim zagęszczeniu, pokrywa się ją natryskowo powłoką elastyczną. Po związaniu się powłoki cała rama zostaje odwrócona i wtedy na powłokę oddziaływuje ciężar skał zawartych w ramie. Niejednokrotnie jest konieczne dodatkowe dociążenie powłoki, aż do przerwania ciągłości badanego materiału. Na rysunku 9 przedstawiono schemat takiego badania.

Rys. 9. Próba "skrzynkowa" Fig. 9. Box test

W czasie badań powłoka została rozparta na ramie i utwierdzona na jej brzegach. Cała jej powierzchnia była obciążana ciśnieniem, które wzrastało i którego wartość była niezależna od miejsca działania. W początkowej fazie badania niewielkie obciążenie powoduje występowanie stosunkowo dużych przemieszczeń w kierunku normalnym do powłoki. Przemieszczenia te są związane ze znacznym wydłużeniem powłoki, pozwalającym na zmianę jej kształtu z płaskiego na wypukły. W przypadku analizy liniowej, na skutek braku redystrybucji naprężeń, powstają znaczne ich spiętrzenia. Wartości naprężeń już przy małych obciążeniach przekraczają wytrzymałość powłoki. Ponadto w czasie analizy liniowej obciążenie działa prostopadle na nieodkształcone elementy, a nie (jak to jest w rzeczywistości) na elementy odkształcone wcześniejszym obciążeniem.

Przyjęty w próbie schemat obciążenia i podparcia jest zbliżony do układu cięgien obciążonych siłą poprzeczną [10], jak to przedstawiono na rysunku 10. W obu przypadkach mamy do czynienia z układem statycznie niewyznaczalnym. Dodatkowo jest konieczne przeprowadzenie obliczeń z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej związanej z brakiem proporcjonalności między odkształceniami ε i przemieszczeniami y.

Rys. 10. Porównywane układy – powłoka i układ cięgien: A – podpory sztywne **Fig. 10.** Compared systems – coat and system of tension members: A – rigid supports

Analizowana konstrukcja charakteryzuje się nieliniowością o charakterze łącznym, tzn. jednocześnie występuje nieliniowość fizyczna (brak proporcjonalności między naprężeniem σ i odkształceniem ϵ), określona biliniową charakterystyką materiału oraz wspomniana wcześniej nieliniowość geometryczna, związana z dużymi przemieszczeniami, które należy uwzględnić przy budowaniu równań równowagi [10].

3.2.2. Symulacja komputerowa próby "skrzynkowej"

Do przeprowadzenia badań wytrzymałości powłoki nałożonej na ramę zostały zbudowane odpowiednie modele. Do ich budowy wykorzystano elementy powłokowe typu SHELL [8] grubości 6 i 10 mm. Dzięki symetrii układu było możliwe ograniczenie symulacji do ćwiartki przedmiotowej powłoki. Uzyskano w ten sposób znaczną poprawę efektywności obliczeń komputerowych. Na rysunku 11 przedstawiono model przedmiotowej powłoki z zaznaczonym obciążeniem i sposobem podparcia.

Rys. 11. Model powłoki: A – zamodelowany fragment, B – symetria układu, C – podparcie na ramie **Fig. 11.** Model of the coat: A – fragment modelled, B – symmetry of the system, C – support on the frame

Pierwszą przeprowadzoną symulacją była analiza liniowa. Elementom nadano parametry materiałowe zgodne z pierwszą linią charakterystyki (E = 73,31 MPa). Przeprowadzona analiza potwierdziła wnioski wynikające z wcześniejszych rozważań. Na rysunku 12 przedstawiono wyniki tej analizy. Pod niewielkim sumarycznym obciążeniem F = 584,35 N ugięcie powłoki wynosi aż $\delta = 0,51$ m. Maksymalne wartości naprężeń osiągają wtedy $\sigma = 3,59$ MPa, co odpowiada maksymalnej wartości naprężeń na pierwszej linii charakterystyki biliniowej.

Fig. 12. Map of stress of the coat model linearly analysed for total load F = 584.35 N (stress values in Pa; scale of displacements $0.2 \times$)

Uzyskane wyniki są obarczone dużym błędem, a wartości naprężeń – przeszacowane. Wynika z tego konieczność przeprowadzenia badań o charakterze nieliniowym z wykorzystaniem biliniowego modelu materiału oraz uwzględnienia dużych przemieszczeń. Symulację przeprowadzono metodą iteracyjną Newtona-Raphsona (NR) [2, 10]. W czasie badań obciążenie wzrastało stopniowo od 0 do wartości odpowiadającej zniszczeniu powłoki. Jako kryterium zniszczenia przyjęto naprężenia o wartości równej granicy wytrzymałości na rozciąganie, wyznaczonej w pierwszej próbie stanowiskowych badań wytrzymałościowych [15].

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono rozkłady naprężeń w modelach w wybranych krokach obciążania powłok, wykonanych z tworzywa tekflex grubości odpowiednio 6 i 10 mm. Maksymalne wartości naprężeń i ugięć powłok odniesione do sumarycznego obciążenia przedstawiono w tablicy 3. Wartości obciążeń odnoszą się do całej powłoki (nie do zamodelowanej ćwiartki).

W czasie kolejnych etapów obciążania następowało zwiększanie ugięcia powłoki. Do momentu osiągnięcia naprężenia 3,67 MPa cała powłoka zachowywała się zgodnie z pierwszą linią charakterystyki. Dla powłoki grubości 6 mm przeskok na drugą linię charakterystyki nastąpił przy sumarycznym obciążeniu $F = \sim 49$ kN (między 9. i 10. krokiem (rys. 13)), dla powłoki grubości 10 mm – $F = \sim 87$ kN (między 17. i 18. krokiem (rys. 14)). W dalszym ciągu procesu dociążania pojawiły się trwałe odkształcenia, które były zlokalizowane w połowie każdego z boków skrzynki. Strefa odkształceń rozprzestrzeniała się w kierunku naroży skrzyni. Po osiągnięciu naprężenia $\sigma_{max} = \sim 3,8$ MPa (między 11. i 12. krokiem dla powłoki 6 mm i w 20. kroku dla powłoki 10 mm) nastąpiło zniszczenie powłoki. Ugięcia powłok w momencie ich zniszczenia wynosiły ~270 mm dla powłoki grubości 6 mm oraz ~280 mm dla powłoki grubości 10 mm.

 Rys. 14. Kolejne wybrane etapy obciążania modelu powłoki tekflex grubości 10 mm; w 20. kroku następuje zniszczenie powłoki (naprężenia podano w Pa)
 Fig. 14. Consecutive selected phases of loading the 10-mm thick tekflex coat; the coat failure occurs in the 20th step (stress values in Pa)

Przeprowadzone symulacje prób wytrzymałościowych pokazały w jaki sposób można modelować zachowanie się powłok statycznie niewyznaczalnych w zakresie nieliniowym. Analiza sprowadza się do wyznaczenia nośności granicznej przedmiotowej powłoki w zależności od warunków brzegowych. Dużą zgodność z charakterystyką wyznaczoną w czasie próby rozciągania oraz liczne nieudane próby modelowania powłok w zakresie liniowym, mogą wskazywać na konieczność modelowania w zakresie nieliniowym z uwzględnieniem dużych deformacji.

Powłoka tekflex grubości 6 mm				Powłoka tekflex grubości 10 mm			
	Obciażonia	Makeymalno	Makeymalno			Makeymalno	Makeymalno
Krok	Obciązenie	nancotonio	ugiocio	Krok	Obciązenie	noprożonio	Iviaksymanie
NIUK			ugięcie	NIUK			ugięcie
	$\Sigma F, KN$	Omax, IVIPa	y _{max} , IIIII		$\Sigma F, KN$		ymax, IIIII
1	5,0	1,21	70,4	1	5,0	0,85	58,1
2	10,0	1,91	89,2	2	10,0	1,30	74,1
3	15,0	2,50	102,7	3	15,0	1,76	85,5
4	20,0	2,94	113,9	4	20,0	2,19	94,7
5	25,0	3,03	124,7	5	25,0	2,58	102,7
6	30,0	3,40	141,0	6	30,0	2,93	109,9
7	35,0	3,52	161,8	7	35,0	3,02	116,6
8	40,0	3,58	184,1	8	40,0	3,08	123,4
9	45,0	3,63	207,2	9	45,0	3,15	131,7
10	50,0	3,69	231,0	10	50,0	3,22	141,9
11	55,0	3,75	255,6	11	55,0	3,30	153,7
				12	60,0	3,37	166,4
12	60,0	3,82	281,1	13	65,0	3,46	179,6
				14	70,0	3,52	193,3
				15	75,0	3,57	207,2
				16	80,0	3,61	221,3
				17	85,0	3,65	235,7
				18	90,0	3,70	250,5
				19	95,0	3,74	265,5
				20	100,0	3,79	280,0

Tablica 3. Wartości obciążeń, naprężeń i ugięcia powłoki (pola ciemniejsze oznaczają zniszczenie)

3.3. Wytrzymałość powłoki badanej w układzie siatki okładzinowej

Badania porównawcze powłok elastycznych i siatek pozwalają na określenie wymagań, jakie muszą spełniać powłoki, aby można nimi było bezpiecznie zastąpić dotychczas stosowane typy opinki.

Atestacvine badania wytrzymałościowe siatek zgrzewanych obeimuja: określenie sprawdzenie materiału, siły ścinającej zgrzeine oraz określenie wytrzymałości siatki. Próba wytrzymałości siatki polega na obciążaniu rozpiętej na ramie siatki w połowie jej długości siła prostopadła przez belke usytuowana poprzecznie do wzdłużnych jej prętów oraz na rejestrowaniu zachowania się ugięcia siatki. W wyniku badań otrzymuje się charakterystykę siatki w układzie obciążenie – ugięcie. W zależności od typu musi ona przenieść obciażenie wywołujące moment o wartości 3,0 kNm (siatki lekkie) lub 6,25 kNm (siatki ciężkie). Pod tym obciążeniem siatka nie powinna wykazywać trwałych odkształceń zaczepów, a jej ugięcie nie może przekroczyć 100 mm [8]. Na rysunku 15 przedstawiono schemat badania siatek okładzinowych.

 Rys. 15. Schemat badania wytrzymałości siatki: A – badana siatka, B – rama, C – belka maszyny wytrzymałościowej
 Fig. 15. Schematic of testing the mechanical strength of the net: A – tested net,

B – frame, C – beam of the testing machine

Przeprowadzenie próby wytrzymałości powłoki w wyżej przedstawionym układzie, przy uwzględnieniu technologii (natryskiwanie), w warunkach rzeczywistych jest trudne lub wręcz niemożliwe do wykonania. Możliwe natomiast jest przeprowadzenie symulacji komputerowej takiej próby.

We wspomnianym układzie powłoka o wymiarach odpowiadających siatce zostaje utwierdzona na krótszych krawędziach w sztywnych, nieprzesuwnych podporach. Jest obciążana w połowie długości obciążeniem ciągłym. Podobnie jak w przypadku próby "skrzynkowej" analityczne rozwiązanie takiego zagadnienia jest trudne ze względu na istniejące nieliniowości o charakterze łącznym (geometryczne i fizyczne). Pod względem wytrzymałościowym układ ten jest zbliżony do belki budowlanej – utwierdzonej na końcach i obciążonej siłą poprzeczną. W tych przypadkach mamy do czynienia z układem statycznie niewyznaczalnym. Dodatkowo jest konieczne przeprowadzenie obliczeń z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej związanej z brakiem proporcjonalności między odkształceniem ε i przemieszczeniem y. Na rysunku 16 przedstawiono układ analogiczny – belkę utwierdzoną na końcach.

Rys. 16. Układ analogiczny – belka obustronnie utwierdzona **Fig. 16.** An analogous system – the beam fastened at both ends

Badania modelowe miały na celu określenie charakterystyk powłok elastycznych badanych w warunkach identycznych jak siatki. Model odzwierciedlał ćwiartkę całej powłoki o rozmiarach siatki. Z tego wynikało określenie odpowiednich więzów na liniach symetrii. Model przedstawiono na rysunku 17.

Rys. 17. Model powłoki tekflex odpowiadający siatce: A – zamodelowany fragment, B – podparcie na ramie, C – symetria układu

Fig. 17. The model of tekflex coat corresponding with the net: A – fragment modelled, B – support on the frame, C – symmetry of the system

Analizom poddano powłoki o wymiarach $1,1 \times 0,5$ m grubości 4–8 mm. Badania przeprowadzono metodą elementów skończonych za pomocą programu COSMOS/M, zgodnie z iteracyjnym algorytmem Newtona-Raphsona (NR) [10]. W wyniku obliczeń otrzymano między innymi postać odkształconą modelu oraz barwne mapy naprężeń w funkcji wzrastającego obciążenia. Przykładowe mapy naprężeń dla wybranych iteracji przedstawiono na rysunku 18, komplet wyników obliczeń natomiast – w tablicy 4, gdzie ciemniejsze pola oznaczają punkty zniszczenia powłoki.

numery iteracji zgodne z przedstawionymi w tablicy 4 Fig. 18. Maps of stresses for the 6 mm-thick tekflex coats; iteration numbers are in accordance with those presented in table 4

Gru	ubość 4 i	mm	Gru	Grubość 5 mm			Gruboś	ć6 mm		Gru	ıbość 8 i	mm
F	у	σ	F	у	σ	lunali	F	у	σ	F	у	σ
kN	mm	MPa	kN	mm	MPa	KIOK	kN	mm	MPa	kN	mm	MPa
0,02	27,9	0,17	0,07	41,7	0,34	5	0,06	38,6	0,32	0,09	37,6	0,36
0,45	90,1	1,12	0,80	101,3	1,46	10	0,80	94,1	1,36	1,07	92,6	1,46
1,34	132,6	2,17	1,16	115,4	1,81	15	1,69	122,6	2,12	1,54	105,6	1,81
2,23	158,6	2,95	1,69	131,8	2,28	20	2,59	142,3	2,72	2,26	120,8	2,25
3,12	179,5	3,36	2,59	153,0	2,93	25	3,48	158,1	3,19	3,45	140,5	2,88
4,02	203,4	3,52	3,48	170,0	3,29	30	4,37	171,8	3,35	4,64	156,2	3,32
4,55	223,1	3,63	4,37	186,6	3,51	40	6,16	201,3	3,56	5,83	170,1	3,47
5,80	281,7	3,64	5,26	207,3	3,54	50	7,94	252,0	3,64	8,21	198,6	3,56
6,69	327,2	3,65	6,16	236,9	3,64	60	9,73	311,4	3,66	10,59	248,5	3,64
7,59	376,4	3,68	7,94	306,8	3,65	70	11,51	376,1	3,68	12,97	307,8	3,66
8,48	430,1	3,71	9,73	384,7	3,69	80	13,30	448,9	3,72	15,35	372,8	3,69
9,24	480,9	3,74	11,51	474,8	3,74	90	15,08	533,1	3,78	17,73	444,9	3,72
9,63	509,6	3,76	12,40	526,5	3,77	93	15,62	561,1	3,80	20,10	528,3	3,77
9,77	520,8	3,77	12,94	560,2	3,80	95	15,97	580,7	3,82	21,06	565,0	3,80
9,81	524,9	3,78	13,30	584,1	3,81	100	16,87	633,1	3,85	22,48	626,6	3,84

Tablica 4. Wyniki analizy wytrzymałościowej powłok tekflex różnych grubości (wybrane kroki obliczeń); zniszczenie powłoki następuje w oznaczonych iteracjach

Przeprowadzone analizy wytrzymałościowe powłoki tekflex oraz wyniki wcześniejszych badań stanowiskowych siatek zgrzewanych pozwalają na porównanie wytrzymałości obu zabezpieczeń powierzchni wyłomu między odrzwiami. Na rysunku 19 przedstawiono przykładowe charakterystyki siatek zgrzewanych, badanych zgodnie z normą PN-G-15050 [8] wraz z naniesionymi charakterystykami powłok wyznaczonymi w czasie analiz modelowych.

Rys. 19. Wyniki analizy wytrzymałościowej: A – siatka ciężka, B – siatka lekka, C – powłoka tekflex Fig. 19. Results of mechanical strength analyses: A – heavy net, B – light net, C – tekflex coat

Charakterystyki wskazują na wyraźne różnice między parametrami powłoki elastycznej i siatkami. Wymagane obciążenie analizowanych okładzin (o wymiarach 1000 × 500) wynosi: dla siatek lekkich – 10,0 kN, dla ciężkich – 20,8 kN. Pod takim obciążeniem siatki lekkie uginają się o ~65 mm, ciężkie o ~100 mm (zgodnie z normą [8] dopuszczalne ugięcie wynosi y = 100 mm) – mogą być więc stosowane do wykonania opinki.

Inna sytuacja ma miejsce w przypadku analizowanej powłoki elastycznej. Mimo bardzo dużej wytrzymałości jej ugięcia były znaczne i pod obciążeniem F = 10,0 kN wynosiły:

- dla powłoki grubości 4 mm y > 525 mm (zniszczenie),
- dla powłoki grubości 5 mm $y = \sim 400$ mm,
- dla powłoki grubości 6 mm $y = \sim 330$ mm,
- dla powłoki grubości 8 mm $y = \sim 240$ mm.

Rys. 20. Wytrzymałość powłoki w zależności od grubości Fig. 20. Mechanical strength of the coat vs. thickness

Na rysunku 20 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości powłoki o założonych parametrach od jej grubości. Dane te zostały wykorzystane w analizie statystycznej, przy czym w analizowanym przedziale (g = 3,5-8,5 mm) można było przyjąć zależność liniową. Równanie regresji przyjmuje zatem postać

$$F_{\rm max} = 2,7906g - 1,188 \tag{3}$$

gdzie:

 F_{max} – maksymalne obciążenie przenoszone przez powłokę tekflex o wymiarach 1000 × 500 mm, kN;

g -grubość powłoki, mm.

Z wykresu oraz z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że minimalna grubość powłoki, która spełnia kryteria wytrzymałościowe stawiane siatkom lekkim wynosi g = 4,01 mm.

Ze względów wytrzymałościowych powłoka tekflex spełnia wymagania normy [8], deformacje natomiast przekraczają wartości dopuszczalne, co wynika z dużej elastyczności materiału.

3.4. Kryteria wynikające z analiz

W celu określenia wszystkich parametrów powłok elastycznych, wymaganych do bezpiecznego zastąpienia siatek, konieczne było uzupełnienie analiz dodatkowymi badaniami. Zakres zmian podstawowych parametrów (moduły sprężystości E i E_T oraz punkt przecięcia linii charakterystyki biliniowej) określono na podstawie rozmów z przedstawicielami producenta powłoki tekflex. Ustalono parametry, które są możliwe do uzyskania dzięki niewielkiej modyfikacji składu chemicznego powłoki elastycznej, przy jednoczesnym zachowaniu jej dużej elastyczności. W badaniach przyjęto parametry powłok przedstawione w tablicy 5.

Parametr	Wartość			
Moduł Younga <i>E</i> , MPa	40 60 80 100			
Moduł Younga $E_{ au}$, MPa	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0			
Naprężenia przy przejściu na drugą linię charakterystyki στ, MPa	3,0 4,0 5,0 6,0			

Tablica 5. Wartości parametrów materiałowych przyjęte w badaniach

W celu przeprowadzenia analizy zbudowano wiele modeli powłok grubości 4 i 8 mm o wymiarach odpowiadających siatce. Powłoki badano w układzie identycznym jak wcześniej. Elementom powłok nadano parametry materiałowe tworząc wszystkie możliwe kombinacje wartości przedstawionych w tablicy 5. Dla każdej z badanych grubości powłok analizowano w ten sposób 80 modeli. Dla każdego z nich otrzymano między innymi wartość maksymalnego naprężenia i ugięcia. W tablicy 6 zestawiono maksymalne ugięcia powłok o różnych parametrach, a w tablicy 7 – maksymalne wartości naprężeń zredukowanych.

Tak duża liczba wyników wymusiła ich prezentację w formie wykresów warstwicowych. Na rysunkach 21–24 przedstawiono ugięcia powłoki grubości 4 mm dla różnych wartości naprężeń, odpowiadających przejściu na drugą linię charakterystyki biliniowej (σ_T), natomiast na rysunkach 25–28 – ugięcia powłoki grubości 8 mm. Izolinie wyznaczono metodą najniższych kwadratów w programie STATISTICA.

<i>στ</i> , Μ	στ, MPa		4,0	5,0	6,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Е	Eτ	þ	oowłoka gruł	oości 4,0 mn	n	þ	owłoka gruł	oości 8,0 mn	1
	0,2	614	385	289	275	229	213	213	213
	0,4	582	362	289	275	229	213	213	213
40,0	0,6	558	378	288	275	229	213	213	213
	0,8	538	375	288	275	228	213	213	213
	1,0		371	288	275	228	213	213	213
	0,2	612	385	286	237	228	185	184	184
	0,4	578	380	285	237	227	185	184	184
60,0	0,6	553	376	285	237	226	185	184	184
	0,8	533	371	284	237	226	185	184	184
	1,0	442	367	283	237	225	185	184	184
	0,2	610	385	286	230	228	169	167	166
	0,4	575	379	285	230	227	169	167	166
80,0	0,6	550	374	284	230	226	169	167	166
	0,8	530	369	283	230	225	169	167	166
	1,0	513	365	281	229	224	169	167	166
	0,2	608	384	286	229	227	165	154	154
	0,4	573	378	284	229	226	165	154	154
100,0	0,6	548	373	283	229	225	165	154	154
	0,8	528	368	282	229	224	165	154	154
	1,0	512	364	281	228	223	165	154	154

Tablica 6. Maksymalne ugięcia powłok w zależności od parametrów materiałowych, mm

Tablica 7. Maksymalne naprężenia w powłokach w zależności od parametrów materiałowych, MPa

σ ₇ , MPa		3,0	4,0	5,0	6,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Е	Ет	þ	powłoka grubości 4,0 mm				owłoka gruł	oości 8,0 mn	1
	0,2	3,179	4,045	5,008	5,556	3,007	3,765	4,072	4,072
	0,4	3,232	4,091	5,017	5,560	3,013	3,767	4,072	4,072
40,0	0,6	3,316	4,130	5,026	5,564	3,020	3,769	4,072	4,072
	0,8	3,391	4,166	5,033	5,569	3,026	3,771	4,072	4,072
	1,0		4,199	5,041	5,572	3,032	3,773	4,072	4,072
	0,2	3,244	4,054	5,021	6,000	3,014	3,820	4,584	4,584
	0,4	3,347	4,106	5,042	6,000	3,028	3,824	4,585	4,711
60,0	0,6	3,422	4,151	5,061	6,000	3,041	3,828	4,586	4,768
	0,8	3,486	4,193	5,081	6,000	3,053	3,832	4,587	4,768
	1,0	3,543	4,231	5,098	6,000	3,064	3,837	4,587	4,768
	0,2	3,411	4,077	5,027	6,007	3,018	4,000	4,783	5,261
	0,4	3,472	4,120	5,053	6,015	3,034	4,000	4,785	5,261
80,0	0,6	3,526	4,161	5,078	6,023	3,050	4,000	4,787	5,261
	0,8	3,575	4,206	5,101	6,030	3,065	4,000	4,786	5,261
	1,0	3,613	4,247	5,123	6,038	3,080	4,000	4,786	5,261
	0,2	3,548	4,114	5,030	6,012	3,020	4,003	4,819	5,538
	0,4	3,585	4,154	5,059	6,025	3,038	4,006	4,821	5,540
100,0	0,6	3,620	4,191	5,087	6,037	3,055	4,010	4,824	5,541
	0,8	3,645	4,226	5,112	6,049	3,072	4,013	4,827	5,541
	1,0	3,655	4,258	5,138	6,060	3,088	4,016	4,830	5,542

Fig. 22. Maximum bends of the 4 mm-thick coat at σ_T = 4.0 MPa vs. the modules of elasticity *E* and E_T

Rys. 23. Maksymalne ugięcia powłoki grubości 4 mm przy σ_T = 5,0 MPa w zależności od modułów sprężystości *E* i *E*_T **Fig. 23.** Maximum bends of the 4 mm-thick coat at σ_T = 5.0 MPa vs. the modules of elasticity *E* and *E*_T

Fig. 24. Maximum bends of the 4 mm-thick coat at σ_T = 6.0 MPa vs. the modules of elasticity *E* and E_T

Fig. 25. Maximum bends of the 8 mm-thick coat at σ_T = 3.0 MPa vs. the modules of elasticity *E* and *E*_T

Fig. 26. Maximum bends of the 8 mm-thick coat at σ_T = 4.0 MPa vs. the modules of elasticity *E* and E_T

Fig. 28. Maximum bends of the 8 mm-thick coat at σ_T = 6.0 MPa vs. the modules of elasticity *E* and E_T

Przedstawione wyniki badań pozwalają na dobór parametrów powłoki w zależności od założonych dopuszczalnych ugięć. Z analizy wynika, że proponowane modyfikacje charakterystyk nie są w stanie zapewnić niewielkich ugięć powłoki na poziomie siatek stalowych. W przypadku powłok grubości 4 mm ugięcia te pod obciążeniem 10,0 kN przyjmują wartości 228–614 mm. Niższe wartości dotyczą powłok o większej sztywności, natomiast duże wartości – powłok bardziej elastycznych. W przypadku grubszych powłok (8 mm) obciążonych identycznymi siłami, rozpiętość ugięć w zależności od parametrów sztywnościowych jest znacznie mniejsza (154-229 mm). Zastosowanie powłoki o charakterystyce opisanej jedną z analizowanych kombinacji parametrów sztywnościowych wiąże się z zapewnieniem jej odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie. Zebrane w tablicy 7 wartości napreżeń zredukowanych przemnożone przez maksymalnych współczynnik bezpieczeństwa, stanowią wymagane minimalne wielkości wytrzymałości powłoki na rozciaganie. Przy założeniu, że wartość ugiecia powłoki o danych parametrach jest akceptowalna, powłoka powinna cechować się wytrzymałościa większa niż naprężenia podane w tablicy 7.

4. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI POWŁOK ELASTYCZNYCH W WYROBISKU

Badania powłok elastycznych w warunkach górniczych są szczególnie istotne z uwagi na ich podstawowe przeznaczenie. Ponadto określenie kryteriów ich stosowania może przyczynić się do bezpiecznego ich wykorzystania, jak również do poprawy efektów ekonomicznych związanych z zabezpieczaniem, niepodpartych odrzwiami, powierzchni wyłomu wyrobisk korytarzowych.

Podstawowym zagadnieniem, jakie należałoby rozważyć przed zastosowaniem natryskiwanych powłok elastycznych, jest zasadność ich użycia. Analizę taką przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych z wykorzystaniem programu COSMOS/M. Do badań zbudowano dwa prawie identyczne modele. Różnica między nimi polegała na tym, że w drugim zamodelowano cienką elastyczną powłokę o parametrach wytrzymałościowych zbliżonych do badanej wcześniej powłoki tekflex. Podstawowy model składał się z dziewięciu sześciennych brył trwale połączonych na płycie. Te fragmenty modelu – bryły i płyta – posiadały parametry wytrzymałościowe węgla. Przerwy (odstępy) między sześcianami symulowały pęknięcia, rysy i szczeliny w wyłomie. Na rysunku 29 przedstawiono pierwszy z modeli – bez elastycznej powłoki.

Rys. 29. Pierwszy z analizowanych modeli – bez elastycznej powłoki **Fig. 29.** The first of the analysed models – without the elastic coat

W celu uproszczenia dyskretyzacji przyjęto sześciany o wymiarach $50 \times 50 \times 50$ mm, położone w odległości 5 mm od siebie. Wszystkie na całej powierzchni jednej ściany przylegały do płyty grubości 5 mm. Płytę tę na zewnętrznym obrysie podparto w trzech kierunkach, a jej niewidoczna na rysunku powierzchnia została obciążona ciśnieniem. W czasie badań określono maksymalną wartość ciśnienia, jaką może być obciążona płyta bez jej zniszczenia. Jako kryterium

zniszczenia modelu wyłomu przyjęto przekroczenie maksymalnych naprężeń odpowiadających wytrzymałości wegla na zginanie. Ich wartość określono na 2,0 MPa [6]. Stosowanie tego kryterium jest uzasadnione z uwagi na charakter obciążenia i podparcia modelu, który w elementach płyty jest związany ze zginaniem. powłoki elastycznej przyjęto maksymalne W przypadku napreżenia. przv których powłoka zachowuje się zgodnie z wystepowaniu pierwsza linia charakterystyki biliniowej. Takie uproszczenie pozwala na ograniczenie analizy jedynie do zakresu liniowego. W tablicy 8 zestawiono podstawowe parametry wytrzymałościowe elementów wchodzacych w skład modeli wyłomu i powłoki, przyjęte z literatury [6] i na podstawie wyników badań laboratoryjnych [15].

Parametr	Model wyłomu (węgiel)	Model powłoki (tekflex)
Moduł sprężystości E	3000 MPa	73,31 MPa
Naprężenia dopuszczalne σ_{dop}	2,0 MPa*	3,67 MPa**
Współczynnik Poissona v	0,2	0,4

Tablica 8. Podstawowe	parametry wytrz	ymałościowe mode	li
-----------------------	-----------------	------------------	----

* Wytrzymałość na zginanie [6].

** Maksymalne naprężenia opisane pierwszą linią charakterystyki biliniowej [15].

W wyniku obliczeń uzyskano, między innymi zdeformowaną postać modeli oraz rozkład naprężeń zredukowanych. W przypadku modelu wyłomu pokrytego warstwą powłoki elastycznej uwzględniono dwa sposoby jej podparcia. W pierwszym przypadku powłoka na krawędziach nie miała odebranych stopni swobody, co odpowiadało odizolowaniu badanego fragmentu od reszty powłoki. Stan taki może wystąpić w przypadku nałożenia jedynie plam powłoki elastycznej lub odcięciu jej fragmentu od reszty. W drugim przypadku analizowano powłokę z odebranymi stopniami swobody na krawędziach, w kierunkach leżących w jej płaszczyźnie. Stan taki odpowiada połączeniu badanego fragmentu z pozostałą częścią. W tablicy 9 przedstawiono przetworzone wyniki obliczeń numerycznych modeli. Wartości obciążenia odpowiadają przerwaniu ciągłości materiału wyłomu (pęknięciu "podstawy węglowej"). Należy zaznaczyć, że wartości ciśnienia, przy których następuje złamanie "podstawy węglowej" odnoszą się jedynie do modelu o założonych warunkach brzegowych oraz wymiarach i nie mogą być bezpośrednio odnoszone do ciśnienia górotworu.

Model	Obciążenie (ciśnienie) <i>p</i> MPa	Maksymalne naprężenia w modelu wyłomu σ _{red} , MPa	Maksymalne naprężenia w modelu powłoki σ _{red} , MPa	
Model wyłomu bez napylonej powłoki elastycznej	0,020	2,0	brak powłoki	
Model wyłomu z napylonym wycinkiem powłoki elastycznej "odciętym" od całości powłoki	0,056	2,0	0,33	
Model wyłomu z napyloną powłoką elastyczną	0,082	2,0	0,27	

Tablica 9. Wyniki obliczeń numerycznych

Na rysunkach 30–32 przedstawiono rozkład naprężeń w analizowanych modelach w momencie osiągnięcia stanu odpowiadającego pękaniu węgla, na rysunku 33 natomiast – barwną mapę deformacji modelu wyłomu z napylonym wycinkiem powłoki elastycznej "odciętym" od reszty powłoki.

Na wszystkich rysunkach widać wyraźnie pracę powłoki w miejscach przykrycia szczelin. W pozostałych miejscach powłoka jest mniej wytężona, co wynika z jej przylegania do brył skalnych.

Wyniki analizy wskazują na możliwość przeprowadzenia badań liniowych, bez uwzględnienia nieliniowości. Wynika to z faktu, że w badanym układzie, przed zmianą parametrów sztywnościowych powłoki, związaną z przeskokiem na drugą linię charakterystyki, następuje uszkodzenie – pęknięcie w modelu wyłomu.

Rys. 30. Rozkład naprężeń w modelu wyłomu bez napylonej powłoki elastycznej (naprężenia podano w Pa; skala deformacji 200×)

Fig. 30. Distribution of stresses in the breakout model without the sprayed elastic coat (stress values in Pa; scale of displacements 200×)

Rys. 31. Rozkład naprężeń w modelu wyłomu z napylonym wycinkiem powłoki elastycznej "odciętym" od całości powłoki (naprężenia podano w Pa; skala deformacji 200×)

Fig. 31. Distribution of stresses in the breakout model with the sprayed elastic coat section "cut off" the whole coat (stress values in Pa; scale of displacements 200×)

Rys. 32. Rozkład naprężeń w modelu wyłomu z napyloną powłoką elastyczną (naprężenia podano w Pa; skala deformacji 200×)

Fig. 32. Distribution of stresses in the breakout model with the sprayed elastic coat (stress values in Pa; scale of displacements 200×)

Rys. 33. Deformacje modelu wyłomu z napylonym wycinkiem powłoki elastycznej "odciętym" od całości (przemieszczenia podano w m; skala deformacji 200×)

Fig. 33. Deformation of the breakout model with the sprayed elastic coat section "cut off" the whole coat (stress values in Pa; scale of deformation 200×) Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że powłoki elastyczne wyraźnie zwiększają odporność skał ociosu na propagację pęknięć i szczelin. W analizowanym modelu zaobserwowano czterokrotne zmniejszenie naprężeń po zastosowaniu powłoki. Stosowanie powłok oraz dalsze analizy są więc w pełni uzasadnione. Należy jeszcze raz zwrócić uwagę na duże uproszczenie poczynione w czasie modelowania oraz związane z tym konsekwencje.

4.1. Badania modelowe powłoki nałożonej na wyłom

Kolejnym badaniem zachowania się powłok w warunkach kopalnianych była symulacja powłoki nałożonej na całą powierzchnię wyłomu między odrzwiami. W badaniach wykorzystano odrzwia wielkości 10 o rozstawie 1,0 m. Na rysunku 34 przedstawiono model badanego układu.

Rys. 34. Schemat badanego układu Fig. 34. Schematic of the system tested

Model został obciążony ciśnieniem działającym na każdy element części walcowej. Wartość tego ciśnienia zmniejszała się liniowo, od wartości jednostkowej do zera, wraz ze zmniejszaniem się kąta działania ciśnienia względem płaszczyzny spągu. Przyjęty schemat obciążeń może być odzwierciedleniem dominującego obciążenia stropowego lub obciążenia grawitacyjnego odspojonymi fragmentami skał stropowych. Pozwala także na uniknięcie wyraźnej granicy między elementami obciążonymi i nieobciążonymi, co może spowodować, że uzyskane wyniki badań będą niezgodne ze stanem faktycznym, jak to pokazano na rysunku 35.

Rys. 35. Rozkład naprężeń w odkształconym modelu w przypadku równomiernego obciążenia ciśnieniem całej części walcowej powłoki (naprężenia podano w Pa; skala deformacji 1×)
Fig. 35. Distribution of stresses in the deformed model in the case of uniform pressure loading of the whole cylindrical part of the coat (values of stress in Pa; scale of displacements 1×)

Rys. 36. Rozkład naprężeń w odkształconym modelu w przypadku dominującego obciążenia stropowego powłoki (naprężenia podano w Pa; skala deformacji 1×)

Fig. 36. Distribution of stresses in the deformed model in the case of dominating roof loading of the coat (stress values in Pa; scale of displacements 1×)

W wyniku obliczeń uzyskano między innymi rozkład naprężeń i odkształconą postać modelu. Na rysunku 36 przedstawiono rozkład naprężeń w modelu w momencie osiągnięcia przez najbardziej wytężony element maksymalnych naprężeń zdefiniowanych pierwszą linią charakterystyki biliniowej. W badaniach posłużono się wynikami badań laboratoryjnych [15] i przyjęto parametry wytrzymałościowe odpowiadające powłokom tekflex. Maksymalna wartość ciśnienia działającego na powłokę wynosi wtedy 5,8 kPa. Należy zwrócić uwagę, że wartość ta nie może być utożsamiana z ciśnieniem górotworu, z uwagi na przejmowanie obciążeń przez odrzwia.

Na rysunku 37 została przedstawiona barwna mapa deformacji modelu poddanego działaniu wyznaczonego wyżej ciśnienia, które odpowiada "wyczerpaniu" możliwości prowadzenia analizy liniowej, czyli osiągnięciu naprężenia 3,67 MPa. Jak widać założone obciążenie powoduje ugięcie powłoki w kluczu o 168 mm. W tym stanie wytężenia i odkształcenia został zachowany wysoki współczynnik bezpieczeństwa, gdyż powłoka pracuje jeszcze w zakresie pierwszej linii charakterystyki biliniowej.

Rys. 37. Mapa deformacji modelu w przypadku dominującego obciążenia stropowego powłoki (przemieszczenia podano w m; skala deformacji 1×)

Fig. 37. Map of deformation of the model in the case of dominating roof loading of the coat (displacement values in m; scale of deformation 1×)

Uzyskane wyniki wygodniej jest interpretować w sposób odwrotny. Wymuszenie przez pracujący górotwór ugięcia powłoki o prawie 170 mm nie powoduje jej uszkodzenia. Ponadto powłoka może pracować dalej lokalnie przyjmując inne, niższe parametry sztywnościowe. Uwzględnienie w analizach stanu po "upodatnieniu" powłoki wymaga przeprowadzenia badań z uwzględnieniem nieliniowości.

4.2. Badania modelowe "wzmocnienia" skał wyłomu

Stwierdzony wcześniej wpływ powłoki na wzmocnienie skał wyłomu, skłaniał do rozszerzenia badań. Badania takie przeprowadzono metodą elementów skończonych. Ich zakres ograniczono do analizy liniowej, tzn. w przypadku powłoki granicznymi naprężeniami były wartości $\sigma_{max} = 3,76$ MPa, natomiast dla modeli wyłomu węglowego przyjęto $\sigma_{max} = 2,0$ MPa. Takie uproszczenie znacznie przyspieszyło analizę. Uzyskane wyniki dają jednak pewien pogląd na zachodzące zjawiska.

W badaniach przyjęto rozstaw odrzwi 1,0 m co, przy uwzględnieniu szerokości kształtownika, dało obszar badawczy długości około 0,83 m. W celu przeprowadzenia analiz konieczne było zbudowanie wielu modeli. Każdy z modeli odzwierciedlał wyłomu płaszczyzna jednocześnie prostopadła do osi przekrój wzdłużnej kształtownika i równoległą do osi wyrobiska. Analizę prowadzono zatem w płaskim stanie odkształcenia. Założono możliwość odkształceń jedvnie w płaszczyźnie analizowanego przekroju. W analizach przyjęto pieć stopni związania brył skalnych z calizna. Stopnie te zamodelowano za pomoca płyt różnych grubości (5-20 mm). W jednym przypadku przyjęto grubość płyty 0 mm, modelując w ten sposób duży stopień odspojenia skał, w którym ich przyleganie do wyłomu jest pomijalnie małe. W większości modeli uwzględniono powłokę elastyczną grubości 4 mm o module Younga przyjmującym wartości: 50; 73,31; 100 i 125 MPa. Wartość 73,31 wynikała z wcześniej przeprowadzonych badań laboratoryjnych powłoki tekflex [15]. Wszystkie modele poddawano jednakowemu obciążeniu ciągłemu działającemu na jedna krawędź modelu.

Rys. 38. Jeden z analizowanych modeli wyłomu: A – elastyczna powłoka, B – wyłom ze szczelinami, C – płyta węglowa, D – obciążona krawędź, E – podparcie

Na rysunku 38 przedstawiono jeden z modeli wyłomu o największym z analizowanych stopniu związania z calizną (płyta grubości 20 mm) z nałożoną

powłoką elastyczną grubości 4 mm. Modele odzwierciedlały blokowy podział skał o wymiarach 50×50 mm. Między bloczkami założono pęknięcia szerokości 5 mm. Tak duża szerokość szczelin wynikała z uproszczenia procesu dyskretyzacji.

W wyniku przeprowadzonych badań numerycznych uzyskano rozkład naprężeń zredukowanych oraz zdeformowaną postać modelu. W tablicy 10 przedstawiono maksymalne wartości naprężeń, jakie wystąpiły w modelach. W przypadku modelu bez podstawy (płyty węglowej) ekstrema naprężeń wystąpiły w elementach powłoki. Wartości maksymalnych ugięć zebrano w tablicy 11. Przedstawione wartości dotyczą modeli obciążanych identycznym obciążeniem ciągłym przyjętym jako jednostkowe.

	Maksymalne naprężenia w modelach, MPa						
Grubość płyty	bez powłoki		z powłoką elastycz	zną grubości 4 mm	I		
węglowej, mm	elastycznej	<i>E</i> = 50 MPa	<i>E</i> = 73,31 MPa	<i>E</i> = 100 MPa	<i>E</i> = 125 MPa		
0	-	2,887*	2,887*	2,887*	2,887*		
5	3,379	0,457	0,383	0,337	0,312		
10	1,601	0,398	0,324	0,277	0,250		
15	0,931	0,369	0,305	0,260	0,233		
20	0,617	0,298	0,255	0,223	0,202		

Tablica 10. Maksymalne naprężenia w modelach w zależności od parametrów powłoki

* Maksymalne wartości występują w powłoce elastycznej.

Tablica 11. Maksymalne ugięcia w modelach w zależności od parametrów powłoki

	Maksymalne ugięcia w modelach, mm				
Grubość płyty węglowej, mm	bez powłoki elastycznej	z powłoką elastyczną grubości 4 mm			
		<i>E</i> = 50 MPa	<i>E</i> = 73,31 MPa	<i>E</i> = 100 MPa	<i>E</i> = 125 MPa
0	_	168,00	115,03	84,52	67,76
5	1,89	0,26	0,20	0,16	0,14
10	1,00	0,21	0,16	0,13	0,11
15	0,46	0,16	0,12	0,10	0,09
20	0,26	0,11	0,09	0,08	0,07

Na rysunku 39 przedstawiono barwne mapy naprężeń zredukowanych, występujące w modelach wyłomu z płytą węglową grubości 5 mm, w zależności od modułu sprężystości powłoki.

Rys. 39. Barwne mapy naprężeń w modelach: A – bez powłoki, B – z powłoką E = 50,0 MPa, C – z powłoką E = 73,3 MPa, D – z powłoką E = 100,0 MPa, E – z powłoką E = 125,0 MPa; skala deformacji $50\times$

Fig. 39. Coloured maps of stresses in the models: A – without coat, B – with coat E = 50.0 MPa, C – with coat E = 73.3 MPa, D – with coat E = 100.0 MPa, E – with coat E = 125 MPa; scale of displacements $50 \times$

Jak widać na przedstawionych mapach naprężeń nawet bardzo elastyczna powłoka znacznie zmniejsza ugięcie wyłomu, zabezpieczając go tym samym przed złamaniem i skruszeniem. Jest oczywiste, że wraz ze wzrostem sztywności powłoki maleje naprężenie i ugięcie w modelu wyłomu. Należy jednak zaznaczyć, że największy wpływ ma samo istnienie elastycznej dobrze przylegającej warstwy "zamykającej" szczeliny i pęknięcia. Powstają w ten sposób układy – mostki, które tworzą ramy o znacznie lepszych parametrach wytrzymałościowych niż parametry belek poprzecinanych siatką szczelin. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie napylanej powłoki jest uzasadnione w przypadkach, gdy skały wyłomu są mocno spękane, odspojone i pokruszone.

4.3. Badania i obserwacje dołowe

Z uwagi na proponowane przeznaczenie powłok elastycznych szczególnie istotne są spostrzeżenia poczynione w czasie badań i obserwacji dołowych. Dotyczą one nie tylko współpracy elastycznej opinki ciągłej z wyłomem, ale także technologii, czyli sposobów jej przygotowywania i natryskiwania. W związku z tym w podziemnych wyrobiskach górniczych są prowadzone obecnie badania powłoki tekflex.

Ze względu na nowatorski charakter prac konieczne jest przeprowadzenie badań dołowych ze zwróceniem uwagi na spełnienie warunków bezpieczeństwa. W miejscach, w których odbywa się normalny ruch jest możliwe zastosowanie powłoki jedynie do osłonięcia ociosów wyrobiska korytarzowego zabezpieczonego obudową odrzwiową. W części stropowej, w drodze wyjątku, nałożenie powłoki powinno być połączone z dodatkowym zastosowaniem sprawdzonej opinki, najlepiej siatek zaczepowych. Ich budowa pozwala skutecznie zabezpieczyć wyrobisko przed skutkami ewentualnego uszkodzenia powłoki elastycznej. W przypadku wystąpienia nadmiernych konwergencji możliwe jest zastosowanie środków zaradczych i zabezpieczenie rejonu badań. Znacznie więcej swobody można uzyskać prowadząc badania w rejonach o minimalnym lub zerowym natężeniu ruchu.

Cały cykl badań powinien być poprzedzony przygotowaniem szczegółowych instrukcji bezpiecznego prowadzenia badań oraz uzyskaniem stosownych dopuszczeń i zezwoleń.

W celu uzyskania obiektywnej oceny wyników badań elastyczną ciągłą opinkę stosuje się na połowie szerokości wyrobiska. Pozostała część, osłonięta siatkami, może służyć jako wzorzec. Badania takie były prowadzone w 2002 roku w kopalni "Chwałowice" w dowierzchni ściany IV/500 w pokładzie 404/3. Miały one charakter jakościowej oceny zachowania powłoki tekflex. Na fotografii 5 i 6 przedstawiono powłokę nałożoną na wyłom w czasie badań dołowych w kopalni "Chwałowice". Widoczna nieprzylegająca do wyłomu siatka może być dowodem na działanie powłoki zapobiegające rozwarstwieniu skał.

Fot. 5. Powłoka tekflex nałożona na ocios Photo 5. Tekflex coat placed on the side-wall

Fot. 6. Powierzchnia powłoki tekflex nałożonej na wyłom (podziałka na linijce – 5 cm)
 Photo 6. Surface of the tekflex coat placed on the breakout (ruler scale – 5 cm)

Ocena jakościowa zachowania się powłoki nie zawsze daje jednoznaczne i obiektywne wyniki. Znacznie bardziej istotne dla dalszego bezpiecznego zastosowania powłok, są badania o charakterze ilościowym. Pozwalają one na określenie w funkcji czasu wielkości "wypchnięcia" wyłomu. Istotna jest także możliwość porównania tych "wypchnięć" z sąsiednimi, występującymi w miejscach, gdzie zastosowano tradycyjną opinkę. Ważne jest, aby oba te stanowiska pomiarowe były umieszczone blisko siebie i charakteryzowały się identycznymi warunkami geologiczno-górniczymi. Celem takich badań jest określenie funkcji wielkości "wypchnięcia" wyłomu w czasie i porównanie jej z przebiegiem "wypchnięć" w miejscach zabezpieczonych siatkami.

W ocenie ilościowej jest konieczne zastosowanie odpowiednich przyrządów pomiarowych oraz przyjęcie właściwego harmonogramu pomiarów. Pomiarów należy dokonywać przy użyciu taśmy mierniczej oraz specjalnego liniału (belki), przedstawionego na rysunku 40.

Rys. 40. Specjalny liniał stosowany do pomiarów przemieszczeń wyłomu i powłoki **Fig. 40.** Special ruler used in measurements of displacements of the breakout and coat

Zaprojektowany do badań liniał pozwala na pomiar przemieszczeń powłoki nałożonej na wyłom wyrobiska zabezpieczonego obudową o rozstawach odrzwi od 0,35 do 1,00 m, stopniując co 5 cm. W przedstawionym na rysunku 40 rozmieszczeniu śrub M6 nadaje się on bezpośrednio dla odrzwi o rozstawie 0,50; 0,75 i 1,00 m. Przystosowanie liniału do innych rozstawów polega na zmianie położenia śrub M6. W przypadku stosowania powłoki grubości większej niż 5 mm, przy jednoczesnym jej napylaniu na odrzwia, jest konieczne zastosowanie dodatkowych tulejek dystansowych montowanych między łbem śruby a ceownikiem. Dzięki zastosowaniu profilu giętego na zimno (C50 \times 25 \times 3) masa kompletnego liniału nie przekraczała 2,2 kg co, obok uniwersalności, jest jego dodatkową zaletą.

Przewiduje się, że wystarczająca częstotliwość pomiarów to jeden pomiar na miesiąc. Jednak w początkowym stadium jest celowe jej zwiększenie do jednego pomiaru na dwa tygodnie. Pomiary muszą być dokonywane za każdym razem w tych samych, trwale oznaczonych, miejscach.

Jest celowe prowadzenie badań na kilku różnych odcinkach badawczych, tak aby było możliwe określenie działania powłoki elastycznej w zależności od jej grubości, a także od jej usytuowania w wyrobisku (strop, ocios, spąg). Pomiary polegają na określeniu położenia punktu charakterystycznego względem bazy, którą są dna sąsiednich elementów obudowy łukowej. W miejscu bazy pomiarowej jest konieczne usunięcie natryśniętej powłoki, tak aby na sąsiednich dwóch odrzwiach uzyskać bezpośredni dostęp do dna kształtownika o średnicy około 40 mm. Punkt charakterystyczny powinien być ustytuowany w połowie odległości między bazami. Na rysunku 41 został przedstawiony schemat dokonywania odczytów przemieszczeń. Pomiary należy wykonywać według poniższego planu:

Pierwszy pomiar:

- wybór miejsca dokonania odczytu,
- przygotowanie stanowisk pomiarowych,
- oznaczenie baz pomiarowych,
- oznaczenie punktów charakterystycznych,
- pomiar położenia punktu charakterystycznego względem liniału,
- przeliczenie danych i rejestracja wyniku.

Następne pomiary:

- wybór miejsca badania,
- oczyszczenie baz pomiarowych i punktów charakterystycznych,
- ewentualne poprawienie oznaczeń,
- pomiar położenia punktu charakterystycznego względem liniału,
- przeliczenie danych i rejestracja wyniku.

Rys. 41. Sposób dokonywania odczytów przemieszczeń punktów charakterystycznych względem baz: A – powłoka, B – odrzwia, C – wyłom, D – baza pomiarowa, E – punkt charakterystyczny, F – liniał, G – przymiar, H – miejsce odczytu

Fig. 41. Method to make readouts of displacements of the characteristic points in relation to bases: A – coat, B – door-frame, C – breakout, D – measuring base, E – characteristic point, F – ruler, G – gauge, H – readout location

Obecnie, zgodnie z przyjętym wyżej planem, trwają badania powłoki tekflex w wyrobiskach górniczych. Badania takie rozpoczęto pod koniec 2002 roku w kopalni "Bogdanka". Na fotografii 7 i 8 przedstawiono powłokę tekflex nałożoną na ocios. Na podstawie pierwszych dokonanych pomiarów można stwierdzić, że zastosowanie powłok elastycznych jako opinki obudowy wyrobisk korytarzowych jest w pełni uzasadnione.

Fot. 7. Powłoka tekflex w czasie nakładania na ocios wyrobiska w kopalni "Bogdanka" Photo 7. Tekflex coat in the course of placing on the side-wall of the working at "Bogdanka" mine

Fot. 8. Powłoka tekflex nałożona na odcinku badawczym w kopalni "Bogdanka"
 Photo 8. Tekflex coat placed on the test section at "Bogdanka" mine

4.4. Wyniki analiz

Na podstawie prowadzonych obecnie badań dołowych oraz symulacji zachowania się powłok nałożonych na wyłom, można określić kilka istotnych kryteriów, którym powinny odpowiadać powłoki, aby mogły być stosowane zamiast powszechnie używanych siatek. Należy wymienić przede wszystkim dobre przyleganie do skał wyłomu i stali. Pozwala to na "sklejanie" odspojonych fragmentów skał i zapobiega powstawaniu dalszych odspojeń. Natomiast dobre przyleganie do stali daje założone w czasie modelowania podparcie powłoki na jej końcach. Bardzo istotne jest spełnienie kryterium jednorodności powłoki i dobrego rozprowadzenia jej na powierzchni wyłomu tak, aby można było wykluczyć niższe parametry wytrzymałościowe w miejscach przykrycia szczelin. W miejscach tych bowiem może rozpocząć się rozerwanie powłoki.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że natryskiwane powłoki elastyczne w pewnych określonych warunkach mogą zastąpić opinkę. Jednym z nich jest możliwość zastosowania danego materiału w wyrobisku górniczym, z czym wiąże się warunek niepalności, niewybuchowości oraz nietoksyczności zarówno podczas nakładania, jak i w czasie właściwego użytkowania. Kolejny warunek to odpowiedni sposób przygotowania powierzchni do napylania i przygotowania napylanego materiału. Proces oczyszczania wyłomu nie może być zbyt pracochłonny. Natomiast sam sposób przygotowania natryskiwanego materiału musi być jednoznacznie określony, pozwalający na uzyskanie odpowiednich powtarzalnych parametrów powłoki elastycznej. Oba procesy przygotowawcze muszą być na tyle krótkie, aby nie spowalniały procesu drążenia wyrobiska.

Materiał przygotowany do wykonania powłoki musi odpowiadać warunkom panującym w danym wyrobisku (temperatura, wilgotność, zawilgocenie skał).

Bardzo istotnymi parametrami ze względów technologicznych są: lepkość przygotowanego materiału i szybkość jego wiązania. Wskazane jest, aby parametry te miały duże wartości, wtedy materiał będzie lepiej przylegał do skał wyłomu oraz możliwe będzie nałożenie grubszej warstwy – dzięki szybkiemu wiązaniu. Z powodu zwiększonych oporów natomiast, duże wartości parametrów spowodują konieczność zastosowania mocniejszych i wydajniejszych agregatów i konieczność szybszego przygotowania mieszanki. Celowe wydaje się, aby materiał mieszany nie miał dostępu do powietrza, a jego wiązanie następowało w wyniku kontaktu z atmosferą kopalnianą.

Na podstawie przeprowadzonych badań określono charakterystyczne cechy powłok elastycznych. Są to:

- dobre przyleganie do skał,
- dobre przyleganie do stali,
- niewywoływanie korozji metali,
- parametry wytrzymałościowe niezależne od grubości,
- wydłużenie względne minimum 30%, wartość zalecana jak największa,
- wytrzymałość na rozciąganie minimum 3,5 MPa, wartość zalecana jak największa,
- moduł Younga 50–150 MPa.

Wyższe wartości modułu Younga są wymagane w celu zapewnienia mniejszych ugięć, jednak w przypadkach, gdy spodziewane ugięcia wyłomu nie są duże możliwe jest zastosowanie powłoki bardziej podatnej – o mniejszym module Younga. W tych przypadkach zasadnicze działanie powłoki polega na zapobieganiu odspajania odłamków skał, jak również podtrzymywaniu już odspojonych brył. Z uwagi na brak oczek charakterystycznych dla siatek, opinka ciągła skuteczniej zabezpiecza wyrobisko przed opadaniem drobnych odłamków skał. Ponadto jej dodatkowym atutem jest to, że może ona być zastosowana po pewnym czasie, na przykład jako środek zaradczy po skorodowaniu siatek.

LITERATURA

- 1. ASTM D 638-91 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- 2. COSMOS/M 2.5 User Manual. Structural Research and Analysis Corporation, 1999.
- 3. Daniłowicz R., Rotkegel M.: *Propozycja zastosowania powłok cienkościennych jako opinki w wyrobiskach korytarzowych i komorowych*. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje 2002 nr 42.
- Dokumentacja pracy naukowo-badawczej AT-757/95 Opinia techniczna okładzin siatkowych lekkich, zgrzewanych, typu zaczepowego o wymiarze oczek 100 × 100 mm, do odrzwi z kształtowników V21, V25 i KS/KO21 o rozstawie 1000 mm i mniejszym (...). E. Kowalski i inni. Katowice, GIG 1995 (niepublikowana).
- 5. Instrukcja nr 1/01 bezpiecznego stosowania, przechowywania i transportu torkretu mineralno-organicznego TEKFLEX. Siemianowice Śląskie, FOSROC Poland 2001.
- 6. Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. Katowice, Wydaw. "Śląsk" 1982.
- 7. Pałkowski S.: Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN 2001.
- 8. PN-G-15050 Obudowa wyrobisk górniczych. Siatki okładzinowe zgrzewane.
- 9. PN-91/H-04310 Próba statyczna rozciągania metali.
- 10. Rakowski G., Kacprzyk Z.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1993
- 11. Rotkegel M.: *Modelowe badania opinki w postaci powłoki TEKFLEX*. Przegląd Górniczy 2002 nr 5.
- 12. Rotkegel M.: Określenie grubości powłoki TEKFLEX wymaganej do zastosowania jej jako opinka obudowy chodnikowej. XLI Sympozjum nt. Modelowanie w mechanice. Gliwice 2002.
- 13. Rotkegel M.: *Symulacja powłoki TEKFLEX jako opinki obudowy chodnikowej*. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa nt. Computer Aided Engineering. Wrocław 2002.
- Sprawozdanie z badań nr 31/96 Badanie okładzin siatkowych zgrzewanych ciężkich, typu zaczepowego, wykonanych wg rys. TG-416.00a (...). B. Sawka i inni. Katowice, GIG 1996 (niepublikowana).
- Sprawozdanie z badań nr 109/01/SM1: Badania wytrzymałościowe torkretu mineralnoorganicznego TEKFLEX (...) H. Rydarowski i inni. Katowice, GIG 2001 (niepublikowane).
- 16. TEKFLEX Materiały informacyjne firmy FOSROC Poland.
- 17. Wojtusiak A.: Okładzina element upodatnienia obudowy. Budownictwo Górnicze 1971 nr 1.

