mgr inż. JAKUB KRÓLAK
dr hab. inż. STANISŁAW SZWEDA

Politechnika Śląska w Gliwicach

Analiza wrażliwości parametrów statycznych sekcji na zmiany kąta pochylenia stropnicy

W artykule przedstawiono wpływ zmiany kąta pochylenia stropnicy na obciążenie statyczne elementów sekcji. Zmiana tego kąta spowodowana jest dostosowaniem postaci geometrycznej sekcji do nierównoległego stropu i spągu wyrobiska. Na przykładzie parametrów sekcji do pokładów niskich, średnich i wysokich stwierdzono, że niewielkie zmiany kąta pochylenia stropnicy skutkują znaczącą zmianą podporności sekcji oraz wartości sił w łącznikach mechanizmu prowadzenia stropnicy.

słowa kluczowe: *górnictwo, mechanizacja, obciążenia statyczne, sekcja obudowy zmechanizowanej*

1. WSTĘP

Zarówno w procesie projektowania sekcji obudowy zmechanizowanej, jak i w procedurze jej badania przyjmuje się założenie równoległości płyty górnej stropnicy do płaszczyzny spągu wyrobiska. Przyjęcie takiego założenia ułatwia prowadzenie badań stanowiskowych. Umożliwia ponadto porównanie parametrów technicznych, takich jak podporność sekcji czy siły wewnętrzne dla sekcji o różnej postaci geometrycznej.

Mechanizm prowadzenia stropnicy umożliwia jednak nierównoległe ustawienie stropnicy i spągnicy sekcji, co jest szczególnie korzystne w warunkach panujących w wyrobisku ścianowym, gdyż pozwala na dostosowanie postaci geometrycznej sekcji do nierównoległości stropu i spągu. Dzięki temu nacisk stropu na stropnicę może być rozłożony na całej powierzchni stropnicy, a nie tylko na jednym jej brzegu. Tak więc kąt pochylenia stropnicy sekcji rozpartej w wyrobiskach, traktowany jako względny kąt pomiędzy płaszczyzną spągu a płytą górną stropnicy, może być różny od zera.

Ze względu na słabe uwarunkowanie układu równań równowagi sekcji obudowy zmechanizowanej [6] niewielka zmiana kąta pochylenia stropnicy, powodująca nieznaczną zmianę postaci geometrycznej sekcji, może skutkować znaczącą zmianą wartości sił wewnętrznych wyznaczanych z równań równowagi.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza wpływu zmiany kąta pochylenia stropnicy na podporność sekcji i siły przenoszone przez przegubowe połączenia jej elementów.

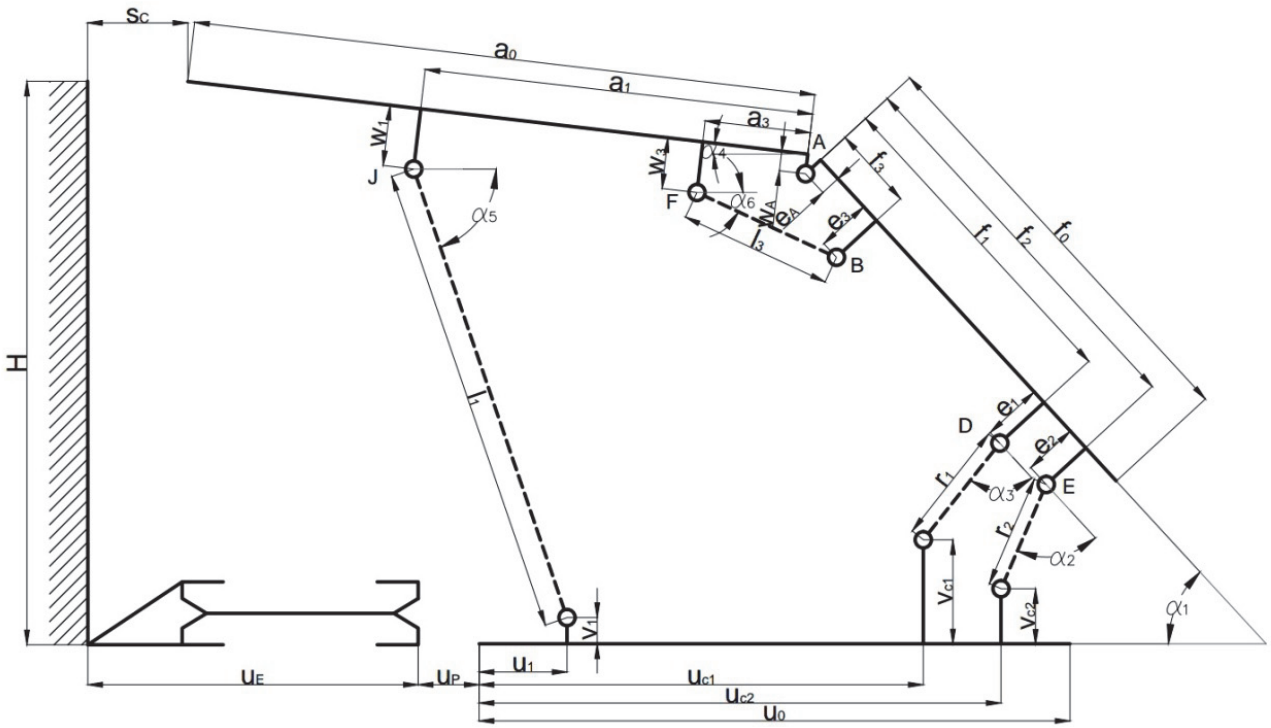
2. SCHEMAT STATYCZNY

Rozpatrywany model geometryczny sekcji przedstawiono na rys. 1. Wielkościami geometrycznymi sekcji, zależnymi od wysokości jej stosowania, są kąty α_1, α_2, α_3, α_5, α_6 oraz długości odcinków l_1, l_3, s_C. Jako stałe potraktowano pozostałe wymiary przedstawione na rys. 1.

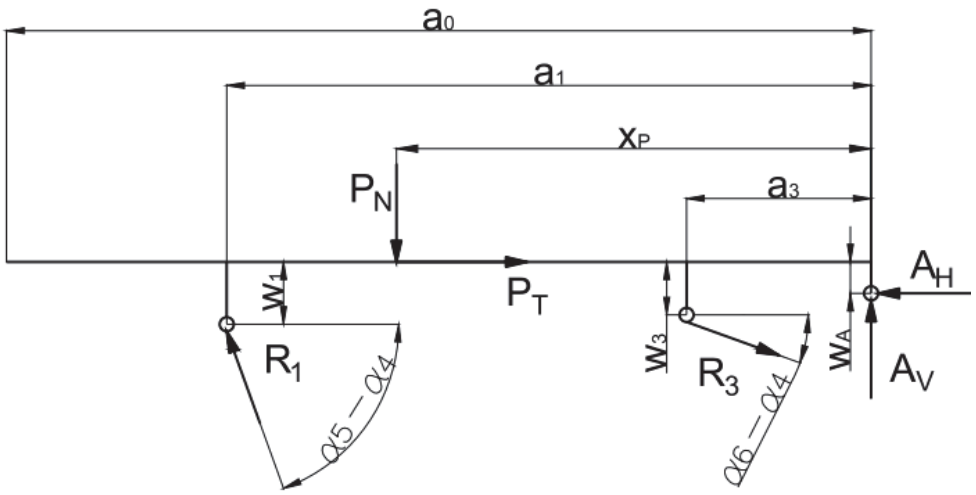
W równaniach równowagi jako wielkości znane traktuje się kąt α_4 pochylenia stropnicy. Równowagę sekcji rozpatrzono w całym zakresie wysokości jej stosowania oraz kąta α_4 zmieniającego się w przedziale $-5° \le \alpha_4 \le +5°$. Przyjmując przedział zmienności kąta α_4, uwzględniono zwyczajowo przyjmowany zakres kąta pochylenia stropu wynikający z zasad doboru sekcji obudowy zmechanizowanej do warunków geologiczno-górniczych.

Rozpatrywane schematy statyczne stropnicy i osłony przedstawiono na rys. 2. i 3. Kąt α_4 pochylenia

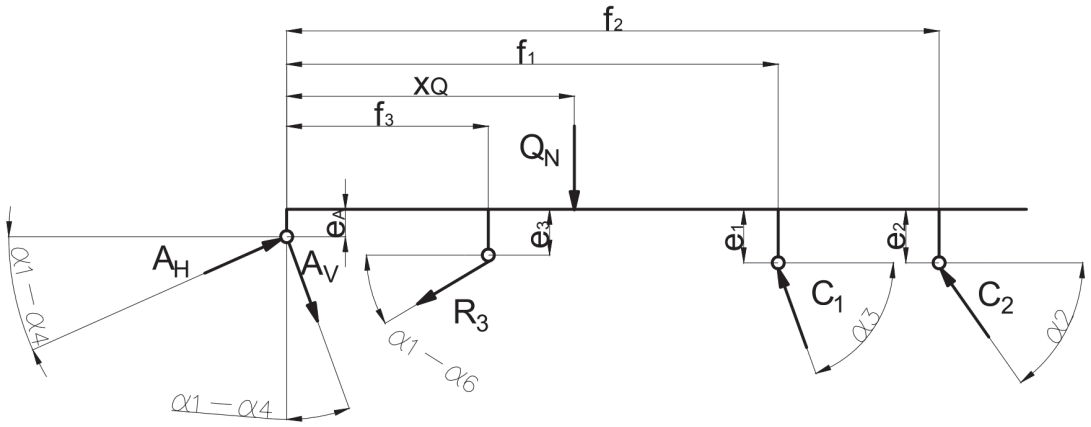
stropnicy względem płaszczyzny spągu uwzględniono na schemacie przedstawionym na rys. 2., podając kąty pochylenia stojaka i podpory stropnicy względem płyty górnej stropnicy, a nie względem płaszczyzny spągu (rys. 1). Analogicznie na rys. 3. podano kąty: pochylenia podpory stropnicy oraz składowych A_H i A_V siły w przegubie łączącym stropnicę z osłoną odzawałową, wyznaczone względem płyty górnej osłony odzawałowej.



Rys. 1. Model geometryczny sekcji przyjęty w obliczeniach [3]



Rys. 2. Schemat statyczny stropnicy [3]



Rys. 3. Schemat statyczny osłony odzawałowej [3]

Ustalając schemat statyczny stropnicy i osłony odzawałowej, przyjęto następujące założenia upraszczające:

- oddziaływanie stropu na stropnicę zamodelowano za pomocą siły skupionej o składowych: P_N, traktowanej jako podporność sekcji, normalnej do płyty górnej stropnicy, i stycznej P_T, traktowanej jako siła tarcia charakteryzowana przez współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0{,}3$,
- nacisk zawału na osłonę przyjęto w postaci siły skupionej Q_N = 600 kN, prostopadłej do powierzchni osłony i przyłożonej w punkcie określonym przez współrzędną $x_Q = 0{,}5f_2$. Siłę tarcia skał zawału o osłonę potraktowano jako pomijalnie małą, biorąc pod uwagę różne zwroty przemieszczeń zawału względem osłony odzawałowej występujące przy zaciskaniu sekcji.

Ponadto obciążenie elementów podstawowych sekcji przedstawionych na rys. 2. i 3. stanowią następujące siły wewnętrzne:

- R_1 – siła w stojaku,
- R_3 – siła w podporze stropnicy,
- C_1, C_2 – siły w łącznikach mechanizmu lemniskatowego prowadzenia stropnicy,
- A_H – składowa siły w przegubie łączącym stropnicę z osłoną odzawałową, styczna do płyty górnej stropnicy,
- A_V – składowa siły w przegubie łączącym stropnicę z osłoną odzawałową, normalna do płyty górnej stropnicy.

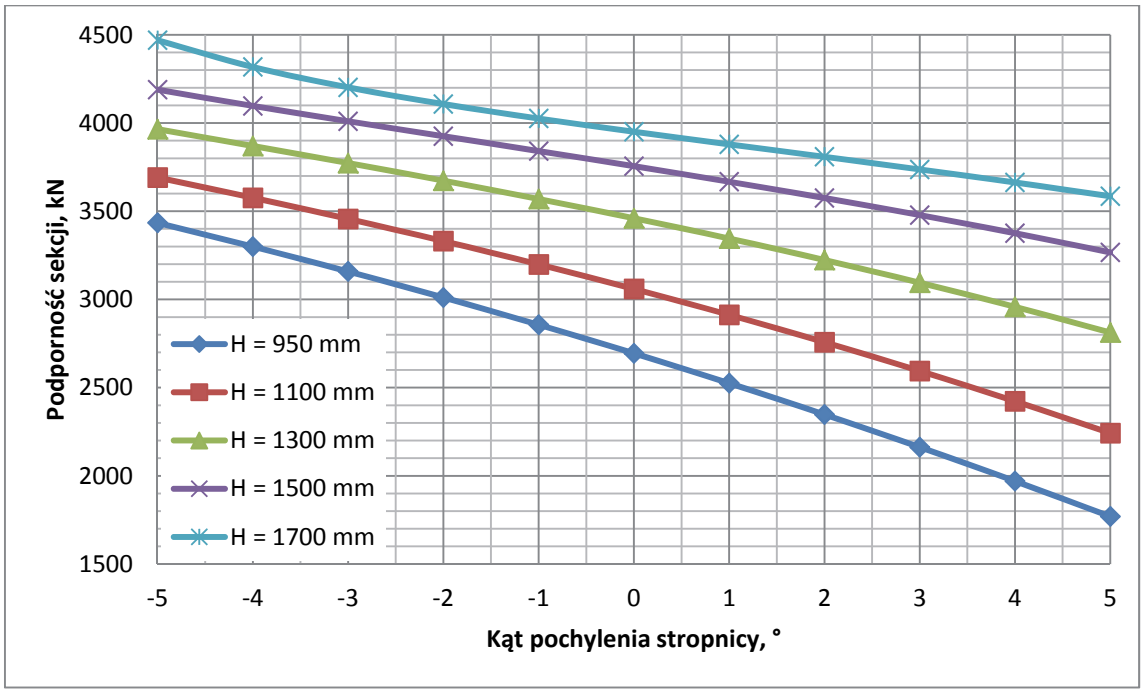
Spośród sił zaznaczonych na rys. 2. i 3. jako znane w równaniach równowagi traktuje się: siłę R_1 w stojaku, siłę R_3 w podporze stropnicy oraz nacisk zawału na osłonę Q_N. Pozostałe siły oraz współrzędną x_P punktu przyłożenia oddziaływania stropu na stropnicę wyznacza się z warunków równowagi stropnicy i osłony. W związku z tym wartości wyżej wymienionych wielkości są zależne od kąta α_4 pochylenia stropnicy. Otrzymany układ równań równowagi stropnicy i osłony odzawałowej rozwiązano, wykorzystując autorski program komputerowy napisany w środowisku MATLAB. Zastosowany algorytm rozwiązania opisano szczegółowo w [3].

3. WPŁYW ZMIANY KĄTA POCHYLENIA STROPNICY NA WYBRANE PARAMETRY STATYCZNE SEKCJI

Analizę wrażliwości parametrów statycznych sekcji na zmiany kąta pochylenia stropnicy przeprowadzono na przykładzie: sekcji do pokładów niskich o zakresie wysokości stosowania wynoszącym 0,95-1,7 m, oznaczonej symbolem AA, sekcji oznaczonej symbolem BB przeznaczonej do pokładów średnich o zakresie wysokości stosowania wynoszącym 1,3-3,4 m oraz sekcji oznaczonej symbolem CC, o zakresie wysokości stosowania wynoszącym 2,2-4,4 m.

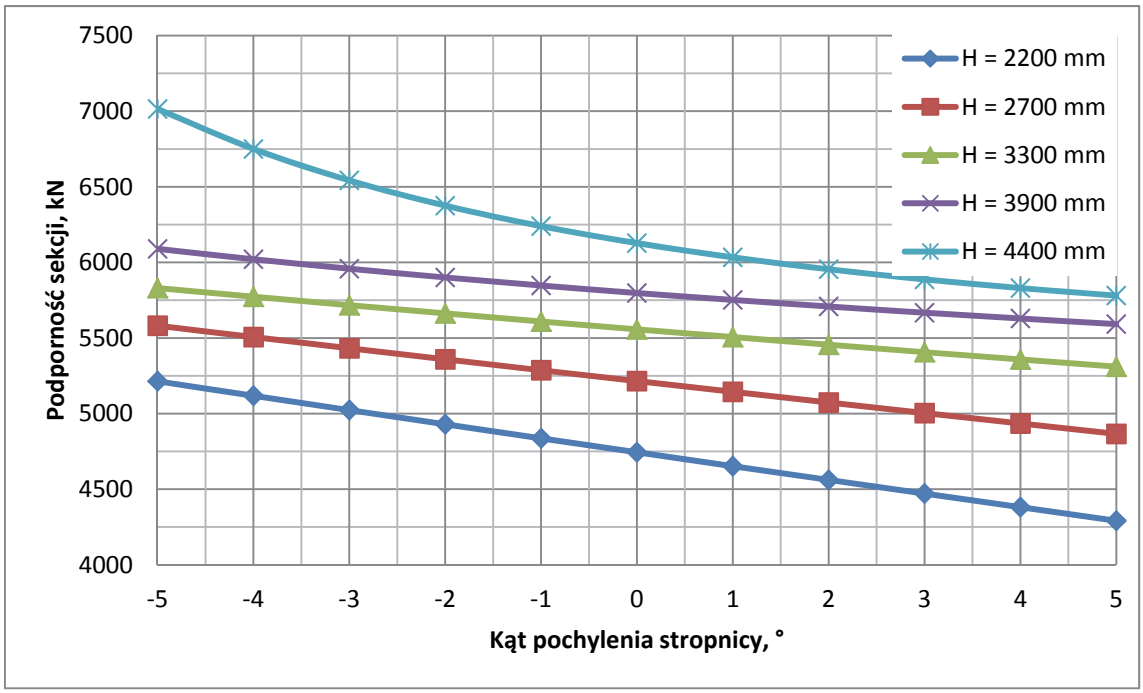
Przedmiotem analizy były następujące parametry: podporność sekcji P_N, siła $A(A_H, A_V)$ w sworzniu łączącym stropnicę z osłoną odzawałową oraz siły C_1 i C_2 w łącznikach.

Na rys. 4. przedstawiono wykresy zmiany podporności sekcji AA w całym zakresie wysokości jej stosowania. Zwiększenie kąta pochylenia stropnicy powoduje zmniejszenie wartości podporności sekcji. Tendencja ta dotyczy wszystkich rozpatrywanych sekcji i całego zakresu wysokości ich stosowania. Z reguły największy wpływ zmiany kąta pochylenia stropnicy na podporność występuje dla najmniejszej wysokości stosowania sekcji. W przypadku sekcji do pokładów niskich podporność sekcji, której stropnica jest pochylona pod kątem $\alpha_4 = 5°$, może być mniejsza nawet o 34% w stosunku do podporności sekcji o stropnicy poziomej.



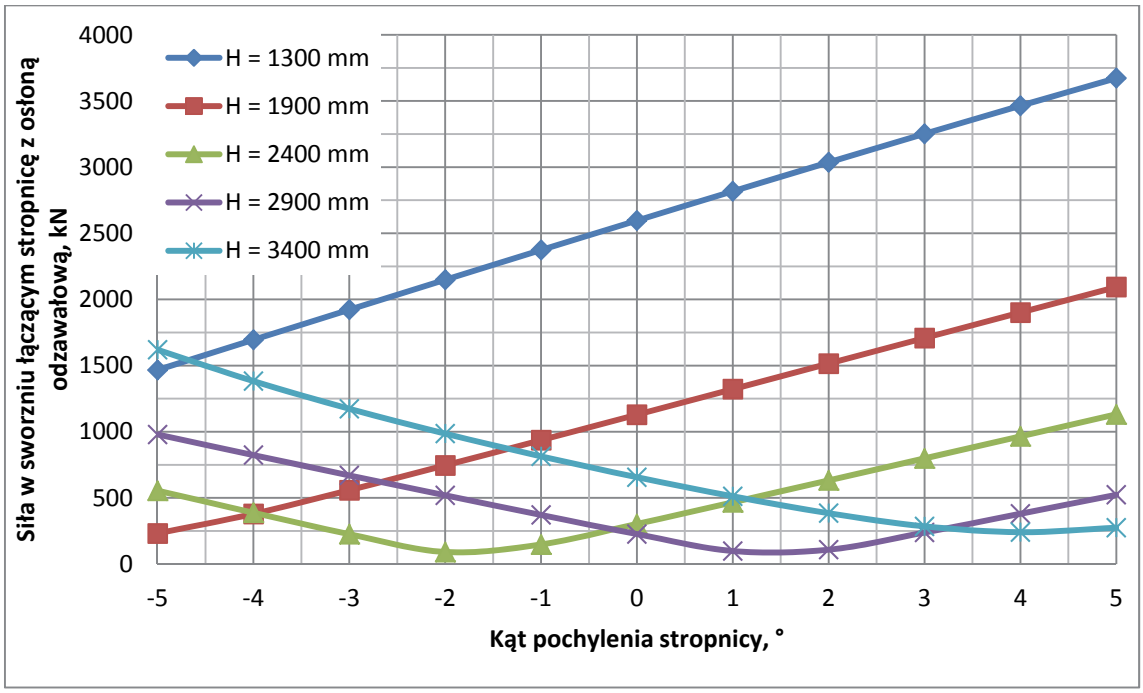
Rys. 4. Zmiana podporności sekcji typu AA w funkcji kąta pochylenia stropnicy [3]

W przypadku sekcji typu BB analogiczna zmiana podporności stanowi ok. 15%, a dla sekcji CC – 14%. W przypadku sekcji typu CC pochylenie stropnicy powoduje największą zmianę podporności P_N dla wysokości stosowania wynoszącej 4400 mm (rys. 5), a nie dla najmniejszej wysokości stosowania.



Rys. 5. Zmiana podporności sekcji typu CC w funkcji kąta pochylenia stropnicy [3]

Na rys. 6. przedstawiono wykresy zmiany wartości wypadkowej siły w sworzniu łączącym stropnicę z osłoną odzawałową dla sekcji typu BB, przeznaczonej do pokładów średnich.



Rys. 6. Zmiana siły A w sworzniu sekcji typu BB w funkcji kąta pochylenia stropnicy [3]

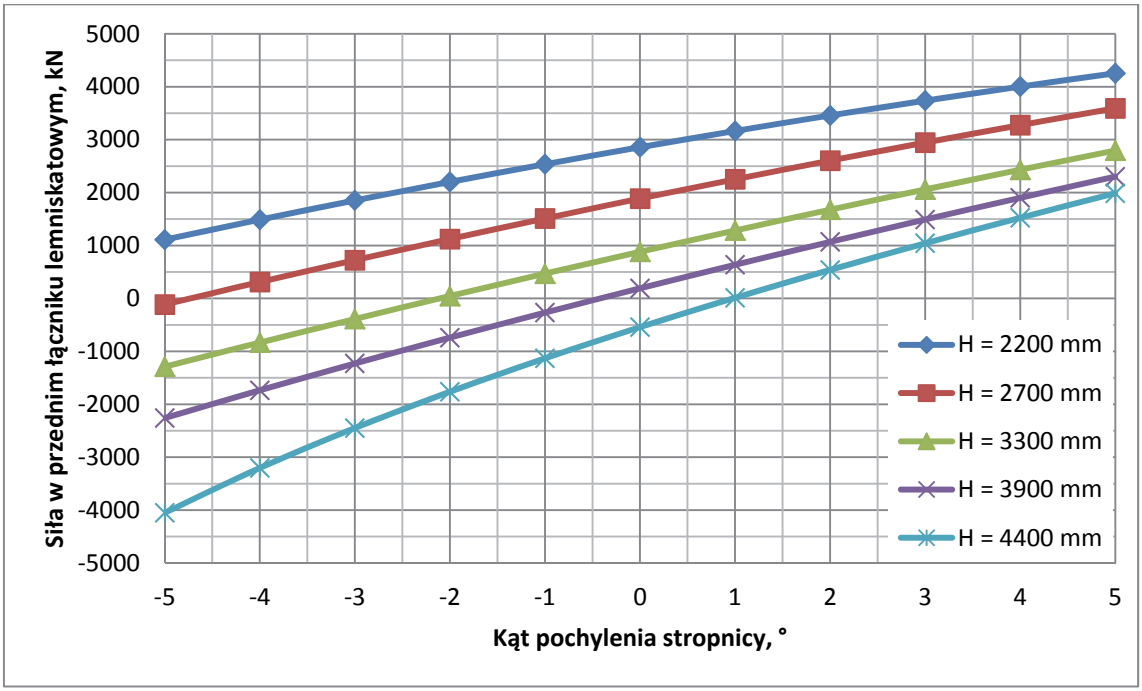
W przypadku wysokości stosowania sekcji zmieniającej się w przedziale 2,4-3,4 m zależność siły A w sworzniu od kąta pochylenia stropnicy nie jest monotoniczna. Charakteryzuje ją minimalna siła w sworzniu o wartości mieszczącej się w przedziale 80-250 kN, występująca przy różnych kątach pochylenia stropnicy. Z przebiegu wykresu $A(\alpha_4)$ dla wysokości stosowania wynoszących 1,3 m oraz 1,9 m można wnioskować, że zależność tę również charakteryzuje minimalna wartość siły w przegubie, ale występująca dla kątów pochylenia stropnicy mniejszych od -5°. W tabeli 1. przedstawiono procentową zmianę wartości siły w sworzniu w stosunku do tej siły w przypadku stropnicy poziomej ($\alpha_4 = 0°$).

Tabela 1.

Zestawienie procentowej zmiany siły w sworzniu odniesionej do wartości tej siły w przypadku stropnicy poziomej (opr. wł. na podst. [3])

Sekcja AA		Sekcja BB		Sekcja CC	
Wysokość stosowania, mm	Procentowa zmiana siły A, %	Wysokość stosowania, mm	Procentowa zmiana siły A, %	Wysokość stosowania, mm	Procentowa zmiana siły A, %
950	-49 ÷ 46	1300	-44 ÷ 41	2200	-75 ÷ 77
1100	-57 ÷ 58	1900	-79 ÷ 85	2700	-54 ÷ 220
1300	-73 ÷ 77	2400	-90 ÷ 273	3300	-96 ÷ 294
1500	-98 ÷ 104	2900	-56 ÷ 332	3900	-72 ÷ 105
1700	-91 ÷ 158	3400	-63 ÷ 146	4400	-61 ÷ 111

Wraz ze zmianą kąta pochylenia stropnicy siła w przednim łączniku lemniskatowym monotonicznie rośnie. Na rys. 7. przedstawiono wykresy zależności siły C_1 w przednim łączniku od kąta pochylenia stropnicy w całym zakresie wysokości stosowania sekcji typu CC. Zmiana kąta pochylenia stropnicy powoduje, że w przedziale wysokości stosowania 3,3-4,4 m siła w łączniku zmienia zwrot.



Rys. 7. Zmiana siły C_1 w przednim łączniku sekcji typu CC w funkcji kąta pochylenia stropnicy [3]

W przypadku pozostałych rozpatrywanych sekcji maksymalne procentowe zmiany siły w łączniku spowodowane zmianą kąta pochylenia stropnicy w zakresie od -5° do +5° uzyskano dla maksymalnej wysokości stosowania sekcji. Wynoszą one: dla sekcji typu AA od -64% dla α_4 = -5° do 53% dla α_4 = 5°. Dla sekcji typu BB analogiczna zmiana wynosi od -465% do 358%.

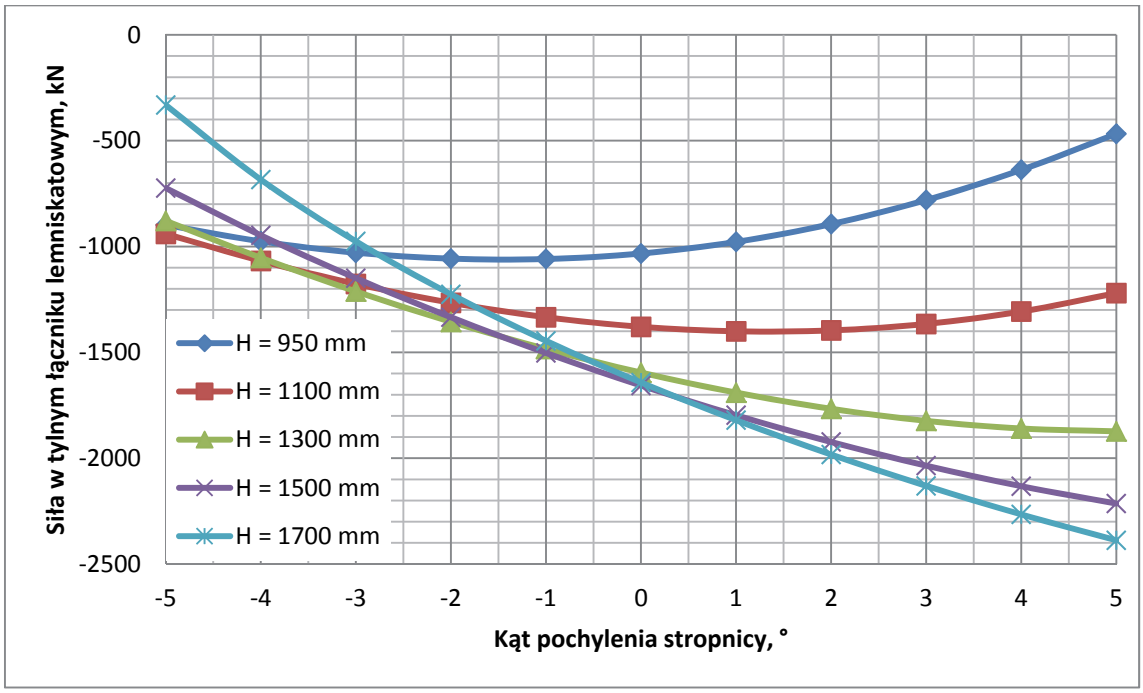
Należy jednak zwrócić uwagę na stosunkowo niewielkie wartości siły w łączniku przednim przy poziomej stropnicy. Dla największej wysokości stosowania wynoszą one bowiem: dla sekcji BB – 601 kN, a dla sekcji CC – 542 kN. Powoduje to, że wyznaczone procentowe zmiany wartości sił w łączniku, spowodowane zmianą kąta pochylenia stropnicy, są duże. W procesie projektowania sekcji obudowy zmechanizowanej maksymalną wartość siły przenoszonej przez łączniki, sworznie i elementy podstawowe sekcji ustala się na podstawie analizy łącznie 16 wariantów obciążenia zewnętrznego sekcji. Porównanie wyznaczonej w ten sposób maksymalnej siły przenoszonej przez łącznik z wartościami sił w łączniku przednim w przypadku, gdy stropnica nie jest pozioma, umożliwi określenie dopuszczalnego przedziału zmienności kąta pochylenia stropnicy ze względu na dopuszczalną siłę w łączniku przednim.

Największe odnotowane zmiany wartości siły wewnętrznej, spowodowane zmianą kąta pochylenia stropnicy w przedziale -5° ÷ +5°, dotyczą tylnego łącznika lemniskatowego.

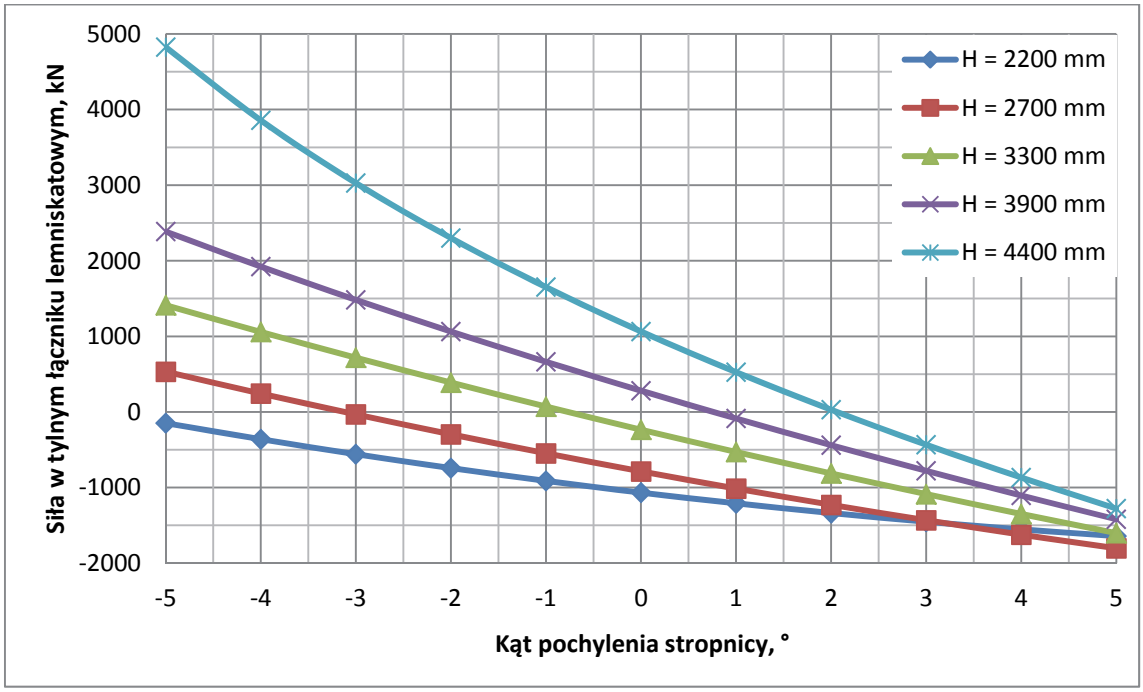
Na rys. 8. i 9. przedstawiono wykresy zmiany siły w łączniku tylnym w całym zakresie wysokości stosowania sekcji AA oraz sekcji CC. Przykładowo dla sekcji CC siła w łączniku tylnym przy stropnicy pochylonej pod kątem α_4 = -5° jest siedmiokrotnie większa od analogicznej siły przy stropnicy poziomej. Należy jednak zaznaczyć, że siła w łączniku tylnym przy α_4 = 0° jest niewielka, wynosi bowiem 281 kN (dla H = 3900 mm).

Z uwagi na tak dużą zmianę wartości siły C_2 konieczne jest uwzględnienie zmiany kąta pochylenia stropnicy przy projektowaniu łącznika i jego połączeń przegubowych. Przykładowo – zakładając, że łącznik tylny sekcji typu CC był projektowany na obciążenie wynoszące 1100 kN, to projektując sekcję, należałoby przewidzieć blokady uniemożliwiające pochylenie stropnicy w dół o kąt większy niż α_4 = -1°.

Wyznaczone zmiany wartości siły w łącznikach będą również skutkowały zmianą wartości sił wewnętrznych przenoszonych przez osłonę i stropnicę sekcji. Zagadnienie projektowania tych elementów wymaga jednak odrębnego potraktowania.



Rys. 8. Zmiana siły C_2 w tylnym łączniku sekcji typu AA w funkcji kąta pochylenia stropnicy [3]



Rys. 9. Zmiana siły C_2 w tylnym łączniku sekcji typu CC w funkcji kąta pochylenia stropnicy [3]

4. PODSUMOWANIE

Konieczność dopasowania wysokości wyrobiska ścianowego do zmieniającej się wciąż miąższości pokładu oraz pokonywania zaburzeń w jego zaleganiu sprawia, że kąt pomiędzy płaszczyzną płyty dolnej spągnicy a płyty górnej stropnicy może zmieniać się w pewnym zakresie. Zagadnienie to nie jest uwzględniane zarówno w badaniach stanowiskowych sekcji, jak i w obliczeniach projektowych.

Z obliczeń zaprezentowanych w niniejszym artykule wynika, że wpływ zmiany kąta pochylenia stropnicy w zakresie -5° ÷ +5° na siły wewnętrzne i podporność sekcji nie może być traktowany jako pomijalnie mały. Istota tego wpływu zależy od wysokości stosowania sekcji (a tym samym od jej cech geometrycznych) oraz rozpatrywanej wielkości fizycznej

(siła w przegubie łączącym stropnicę z osłoną, siła w łącznikach bądź podporność sekcji).

W szczególności można uznać, że:

- wraz ze wzrostem wartości kąta pochylenia stropnicy maleje podporność sekcji,
- siła w przegubie łączącym stropnicę z osłoną odzawałową dla danej wysokości w przypadku każdej spośród badanych sekcji przyjmuje minimum dla pewnej wartości kąta pochylenia stropnicy,
- wartość procentowa zmiany siły w przegubie łączącym stropnicę z osłoną odniesiona do analogicznej siły przy stropnicy poziomej zmienia się w przedziale -44% ÷ 332% w zależności od typu sekcji i wysokości stosowania,
- zmiana kąta pochylenia stropnicy skutkuje nawet siedmiokrotnym zwiększeniem siły w łączniku lemniskatowym. Istnieje zatem konieczność uwzględnienia w procesie projektowania zmiany wartości sił w łącznikach, spowodowanej pochyleniem stropnicy. Istotny wpływ zmiany kąta pochylenia stropnicy na zmiany wartości sił w połączeniach przegubowych elementów podstawowych sekcji sprawia, że zmiany tych sił należy uwzględniać w procesie projektowania sekcji obudowy zmechanizowanej, na przykład poprzez montaż blokad uniemożliwiających nadmierne wychylenie stropnicy. Wyniki obliczeń przedstawione powyżej świadczą również o konieczności zwrócenia uwagi na rozpieranie sekcji w taki sposób, by stropnica była pozioma.

Jakkolwiek wyznaczone i przedstawione w niniejszym artykule procentowe zmiany wartości sił w przegubach sekcji, spowodowane zmianą kąta pochylenia stropnicy, są bardzo duże, to nie muszą one świadczyć o znacznym obniżeniu poziomu bezpieczeństwa użytkowania sekcji. Jak już zaznaczono, połączenia przegubowe są zazwyczaj projektowane na obciążenie wynikające z analizy wielu wariantów obciążenia zewnętrznego sekcji różniących się podpornością stojaków, wartością i zwrotem siły w podporze stropnicy oraz obciążeniem osłony odzawałowej. W związku z tym o zmniejszeniu wartości współczynnika bezpieczeństwa rozpatrywanego połączenia, spowodowanego pochyleniem stropnicy, świadczyłoby na przykład: odniesienie zmiany wartości siły w przegubie łączącym stropnicę z osłoną odzawałową do wartości siły, na jaką to połączenie było projektowane, a nie do wartości siły przy stropnicy poziomej, i założeń dotyczących wariantu obciążenia sekcji, przedstawionych w p. 2.

W zaprezentowanych przykładach obliczeniowych założono, że podporność stojaków jest równa ich podporności roboczej. Ponieważ w trakcie użytkowania sekcji ciśnienie w przestrzeniach podtłokowych stojaków stosunkowo rzadko osiąga wartość równą ciśnieniu roboczemu, to proporcjonalnie do ciśnienia w stojakach zmniejszają się również wartości sił wewnętrznych sekcji. W związku z tym uszkodzenia połączeń przegubowych i łączników sekcji nie będą występowały tak często, jak wynikałoby to z procentowej zmiany siły przenoszonej przez te elementy, przedstawionej w niniejszym artykule.

Literatura

1. Biliński A., Kostyk T.: *Sposób oceny prawidłowości współpracy obudowy zmechanizowanej z górotworem w wyrobisku ścianowym – na podstawie pomiaru zsuwu stojaków*. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, 1998, nr 7, s. 25-28.
2. Jaszczuk M.: *Ścianowe systemy mechanizacyjne*, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2007.
3. Królak J.: *Analiza wpływu kąta pochylenia stropnicy na siły wewnętrzne w elementach sekcji oraz oddziaływanie stropnicy na strop*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Instytut Mechanizacji Górnictwa, Gliwice 2014 (niepublikowana).
4. Losiak S., Ptak J., Ślusarz R.: *Właściwości podpornościowe sekcji obudowy w warunkach nierównoległości stropu i spągu*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2004, nr 1, s. 5-9.
5. Losiak S., Ptak J., Ślusarz R.: *Współdziałanie z górotworem sekcji lemniskatowych różniących się kinematyką*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2002, nr 5, s. 16-22.
6. Stoiński K.: *Identyfikacja wektora obciążenia zewnętrznego sekcji obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu*, redakcja sprawozdania szczegółowego z projektu badawczego nr 5 T12A 043 24, dokumentacja Instytutu Mechanizacji Górnictwa Pol. Śl., Gliwice 2004 (niepublikowana).

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.