

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.6>

Analiza wytrzymałościowa MES konstrukcji nadstawki spągnicy i jej wpływ na wytrzymałość spągnicy

Marek Szyguła – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Mazurek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Michał Szelka - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Przedstawiono czynniki wpływające na coraz częściej prowadzone modernizacje sekcji obudowy zmechanizowanej oraz typowy zakres tych modernizacji. Opisano rodzaje spotykanych rozwiązań konstrukcyjnych nadstawek spągnicy, pozwalających na podwyższenie zakresu wysokości roboczej sekcji obudowy. Na konkretnym przykładzie pokazano prowadzone analizy wytrzymałościowe za pomocą metody elementów skończonych (MES), pozwalające na opracowanie zespołu konstrukcyjnego (nadstawki spągnicy), spełniającego kryteria wytrzymałościowe, umożliwiające jego zastosowanie w konkretnej sekcji obudowy. Zaprezentowano sposób modyfikacji konstrukcji dla uzyskania możliwie najniższego wyężenia materiału przy założonym obciążeniu zewnętrznym, a także wpływ zastosowania nadstawki spągnicy na wytrzymałość spągnicy sekcji obudowy oraz zaproponowano modyfikację jej konstrukcji dla zniwelowania wzrostu naprężenia wewnętrznego wywołanego modernizacją.

Słowa kluczowe: sekcja obudowy zmechanizowanej, spągnica, nadstawka spągnicy, modernizacja, analiza wytrzymałościowa MES

FEA strength analysis of the base extension structure and its impact on the strength of the base

Abstract: The factors affecting the base of the more and more frequently carried out modernizations of the powered roof supports as well as the typical scope of these modernizations are presented. Described are the types of common design solutions of the base extensions, allowing for the increase of the working height range of the roof support section. A specific example shows the conducted strength analyses using the finite element method (FEM), that allow for the development of a structural unit (base extensions) that meets the strength criteria, enabling its use in a specific powered roof support. The method of modifying the structure in order to obtain the lowest possible material stress under the assumed external load is presented, as well the impact of the use of a base extension on the strength of the base of the roof support is shown, and a modification of its structure is proposed to compensate for the increase in internal stress caused by the modernization.

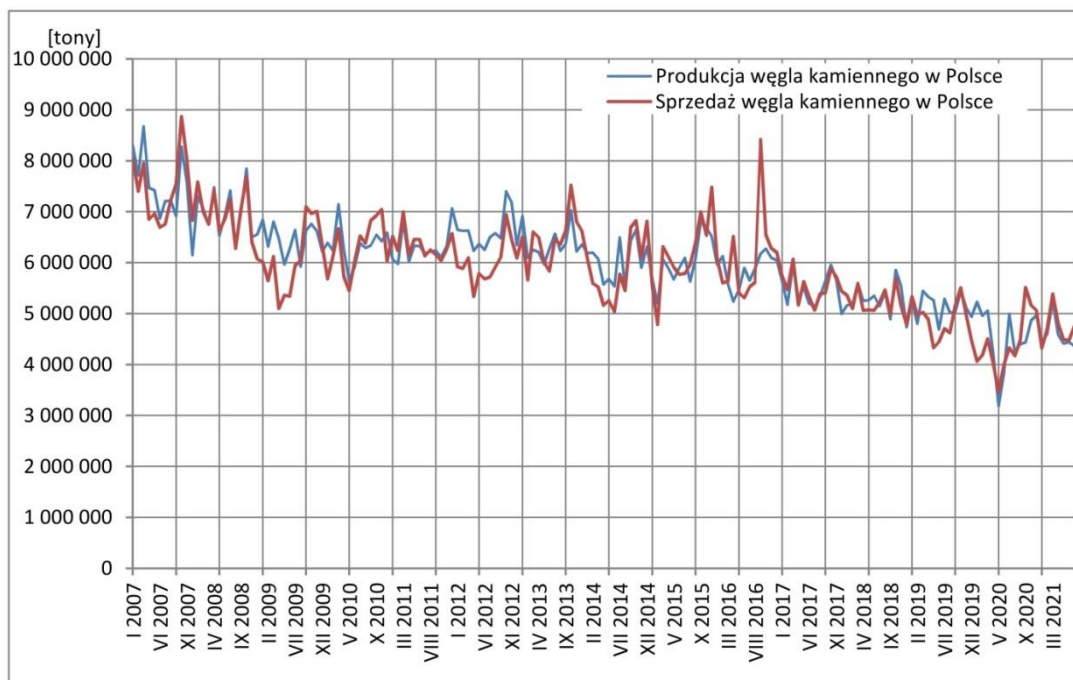
Keywords: powered roof support, base, base extensions, modernization, FEM strength analysis

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach na polskim rynku obserwuje się stopniowe zmniejszanie liczby podziemnych zakładów górniczych wydobywających węgiel kamienny. Wynika to nie tylko z wyczerpywania zasobów węgla, ale również z przyczyn ekologicznych oraz ekonomicznych. Węgiel energetyczny stał się paliwem postrzeganym jako paliwo „brudne”, przyczyniające się do zmian klimatycznych. Wraz ze zwiększaniem głębokości, na których wydobywa się węgiel, w polskich kopalniach rosną też koszty jego wydobycia. Często węgiel importowany jest tańszy od pozyskiwanego w kraju. W całej Unii Europejskiej obserwuje się spadek zapotrzebowania na węgiel energetyczny. Energię elektryczną wytwarza się z wykorzystaniem m.in.: gazu ziemnego, reaktorów jądrowych oraz z odnawialnych źródeł energii (OZE). Większość państw Unii Europejskiej zaprzestała już wydobycia węgla kamiennego. Obecnie tylko dwa kraje, Polska i Czechy prowadzą jego wydobycie, z czego udział Polski wynosi aż 96% [1]. W niedalekiej przyszłości Polska będzie jedynym krajem Unii Europejskiej wydobywającym węgiel kamienny. Nie oznacza to jednak, że pozostałe kraje go nie wykorzystują. W 2020 roku wydobycie węgla kamiennego w Unii Europejskiej wyniosło 56,5 mln ton, a jego

zużycie szacowane jest na poziomie 144 mln ton [1]. Zatem ponad 60% zużywanego w Unii Europejskiej węgla kamiennego pochodzi spoza jej obszaru.

Wraz ze zmniejszeniem liczby polskich kopalń węgla kamiennego spada produkcja węgla, zużycie oraz poziom zatrudnienia pracowników w polskich kopalniach [2, 3]. Na rysunku 1 pokazano zmiany wielkości wydobycia i sprzedaży węgla kamiennego z polskich kopalń w latach 2007-2021. Często sprzedaż węgla przewyższa jego produkcję, stąd wahania dostępnych jego zapasów [4]. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany zapasów węgla w tym samym przedziale czasowym.

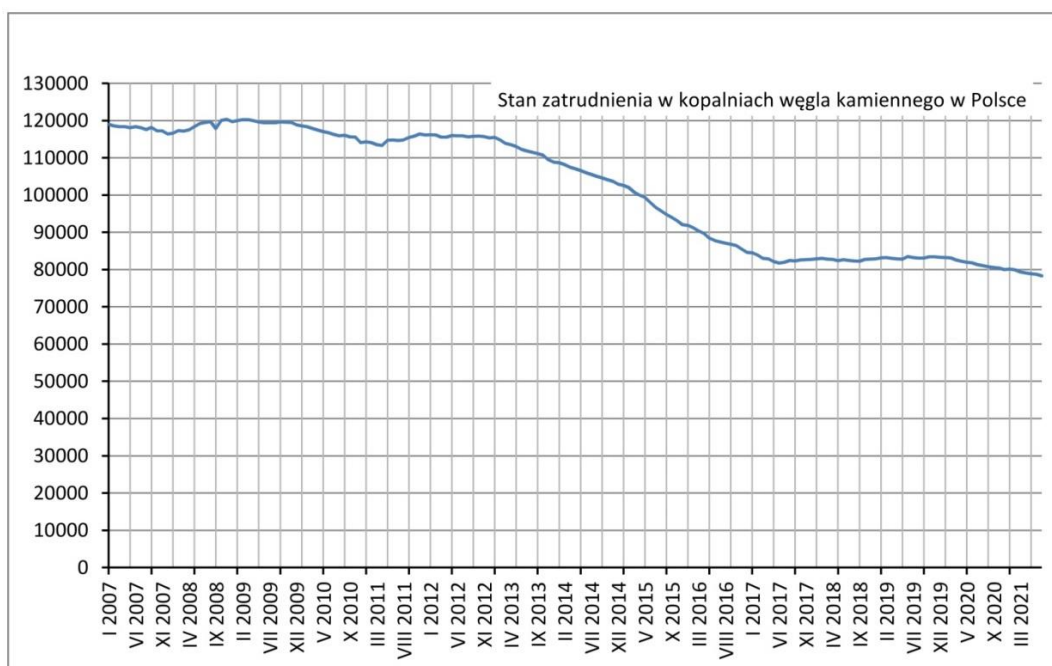


Rys. 1. Zmiany wielkości wydobycia i sprzedaży węgla kamiennego z polskich kopalń w latach 2007-2021 (Opracowanie własne na podstawie [2])



Rys. 2. Zmiany zapasów węgla w Polsce w latach 2007-2021 (Opracowanie własne na podstawie [4])

Wraz ze spadkiem produkcji spada również poziom zatrudnienia w kopalniach węgla kamiennego. Zmiany poziomu zatrudnienia w analogicznym okresie pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Zmiany poziomu zatrudnienia w polskich kopalniach w latach 2007-2021
(Opracowanie własne na podstawie [3])

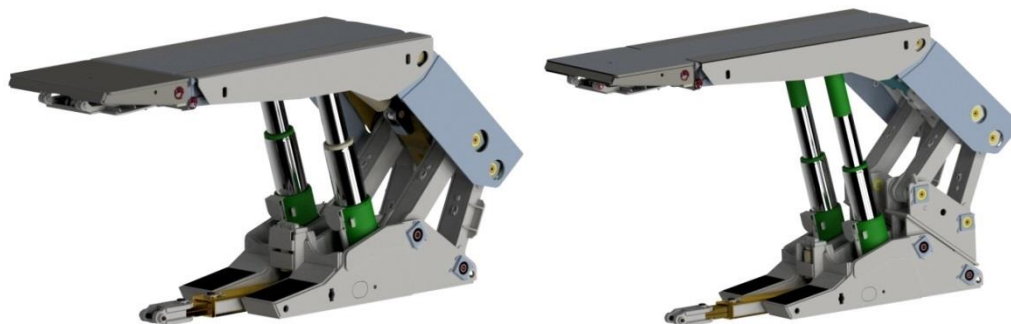
Zmniejszanie wydobycia węgla kamiennego w Polsce i zmniejszanie liczby zakładów górniczych spowodowało, że w kopalniach obserwuje się nadmiar podstawowych maszyn stosowanych w ścianach wydobywczych. Stąd coraz mniej jest zamówień nowych maszyn, w tym sekcji obudowy zmechanizowanej. Zakłady górnicze dysponują dużą liczbą sekcji obudowy zmechanizowanej, które nie są obecnie wykorzystywane. Nie wszystkie jednak mogą zostać wprost wykorzystane w nowych ścianach, ze względu na warunki geologiczno-górnicze, parametry techniczne itp. W takich przypadkach zamawiane są nowe sekcje obudowy lub coraz częściej prowadzone są modernizacje sekcji posiadanych przez kopalnie. Modernizacje najczęściej polegają na zmianie (podwyższeniu) zakresu wysokości pracy tych sekcji, rzadziej ze zwiększeniem ich podporności roboczej lub korektą kształtu zespołów podstawowych [5, 6].

2. Modernizacje sekcji obudowy zmechanizowanej

W przeszłości najczęściej wykorzystywanymi sekcjami obudowy zmechanizowanej były sekcje o zakresie wysokości pracy do 3 m. Polskie kopalnie posiadały i wykorzystywały głównie zaprojektowane w ITG KOMAG (Instytut Techniki Górniczej, wcześniej Centrum Mechanizacji Górnictwa) sekcje obudowy FAZOS-12/28 i GLINIK-08/22. Na przestrzeni lat sekcje te były wielokrotnie modernizowane ze względu na zmieniające się przepisy (głównie dotyczące szerokości przejścia dla załogi przez ścianę), ale również ze względu na zmieniające się warunki eksploatacji. Zmieniana była długość stropnic i spągnic, zwiększana podporność stojaków oraz podwyższany zakres wysokości sekcji [7]. Niektóre kopalnie nadal dysponują sekcjami powstałymi w wyniku modernizacji tych podstawowych kiedyś typów, chociaż wiek pierwotnych elementów tych sekcji nieraz przekracza już 40 lat. Sekcje, które zostały zaprojektowane w latach późniejszych, częściej miały wyższy zakres wysokości pracy, ale również podlegały modernizacji ze względu na dostosowanie do nowych warunków przewidzianej eksploatacji. W wyniku prowadzonych modernizacji sekcje obudowy stawały się nowymi typami sekcji, więc w efekcie, w polskich kopalniach pojawiło się kilkaset typów sekcji obudowy [8]. Duża część z tych typów miała jednak wiele cech konstrukcyjnych wspólnych, gdyż do modernizacji wykorzystywano takie same zespoły

pierwotne. Praktycznie dopiero po 2000 roku zaczęło przybywać sekcji obudowy zaprojektowanych od podstaw. Jednak z biegiem lat również te nowsze sekcje obudowy zostały już poddane modernizacji. Wszystkie sekcje obudowy zmechanizowanej poddane modernizacji podlegały badaniom typu oraz certyfikacji tak samo jak sekcje nowe. Badania były przeprowadzane wg normy PN-G-50041, a od 2004 roku wg norm międzynarodowych z serii EN 1804-1,2,3 [9].

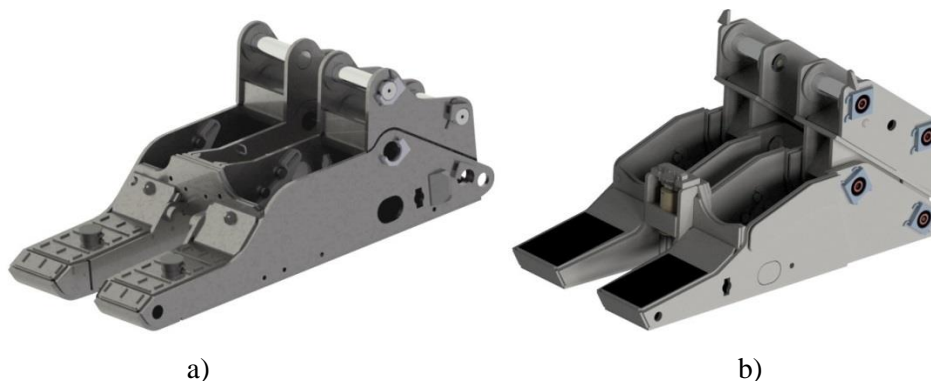
Obecnie większość modernizacji polega na zwiększeniu zakresu wysokości pracy sekcji. Modernizacje te prowadzone są na podobnych założeniach – podnosi się punkty przyłączenia łączników lemniskatowych do spągnicy, poprzez zastosowanie tzw. nadstawki spągnicy (rys. 4). Jeżeli z nadstawką nie podnosi się gniazda stojaka hydraulicznego to wydłużeniu lub wymianie podlega również stojak.



Rys. 4. Modele sekcji obudowy w wykonaniu pierwotnym i w wykonaniu podwyższonym z zastosowaniem nadstawek spągnicy

Stosowane są różne sposoby wydłużenia stojaka hydraulicznego. Najczęściej wydłużenie polega na zastosowaniu przedłużacza zakładanego na końcówkę rdzennika stojaka. Rzadziej do spodnika stojaka dospawana zostaje dodatkowa rura ze stopą. Rura ta pozostaje pusta podczas pracy stojaka. Najkorzystniejsze i jednocześnie najdroższe jest zastosowanie nowego stojaka, który pozwala nie tylko na podwyższenie, ale również na rozszerzenie zakresu wysokości roboczej sekcji obudowy.

Nadstawka spągnicy podnosi punkty przyłączenia łączników lemniskatowych do spągnicy. W zdecydowanej większości modernizacji punkty te podnoszone są w linii pionowej, bez zmiany charakterystyki ruchu sekcji. Najprostszym rozwiązaniem nadstawki spągnicy jest przyspawanie blach podwyższających spągnicę do jej tężników (rys. 5a). W blachach tych znajdują się nowe otwory do podłączenia łączników lemniskatowych, z wykorzystaniem dotychczasowych sworzni lemniskatowych spągnicy. Obciążenie z nadstawki jest przenoszone bezpośrednio na tężniki spągnicy. W takim rozwiązaniu nie ma możliwości prostego powrotu do wyjściowej wysokości sekcji. Zatem częściej stosowane jest rozłączne połączenie nadstawki ze spągnicą – połączenie sworzniami (rys. 5b). Obciążenie z nadstawki jest przenoszone na spągnicę poprzez jej sworznie lemniskatowe. Konieczne jest wykonanie nowych sworzni do połączenia nadstawki z łącznikami lemniskatowymi, lecz istnieje możliwość powrotu do wyjściowej wysokości sekcji. Sekcja z nadstawkami rozłącznymi uzyskuje dwa zakresy wysokości pracy.

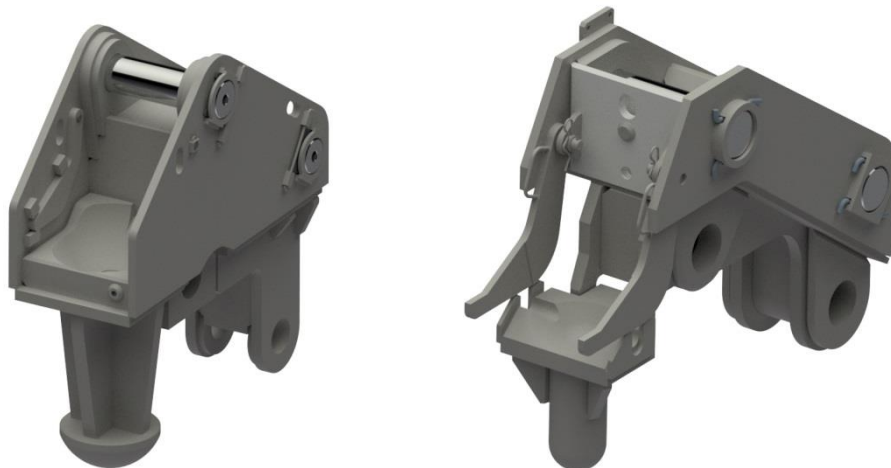


Rys. 5. Stosowane rozwiązania połączenia nadstawek spągnicy ze spągnicami

Nadstawka spągnicy może podnosić tylko punkty przyłączenia łączników lemniskatowych lub te punkty i gniazdo posadowienia stojaka hydraulicznego sekcji obudowy. Przykłady obu rozwiązań pokazano na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Przykłady nadstawek spągnicy podnoszących tylko punkty przyłączenia łączników lemniskatowych



Rys. 7. Przykłady nadstawek spągnicy podnoszących gniazdo posadowienia stojaka hydraulicznego

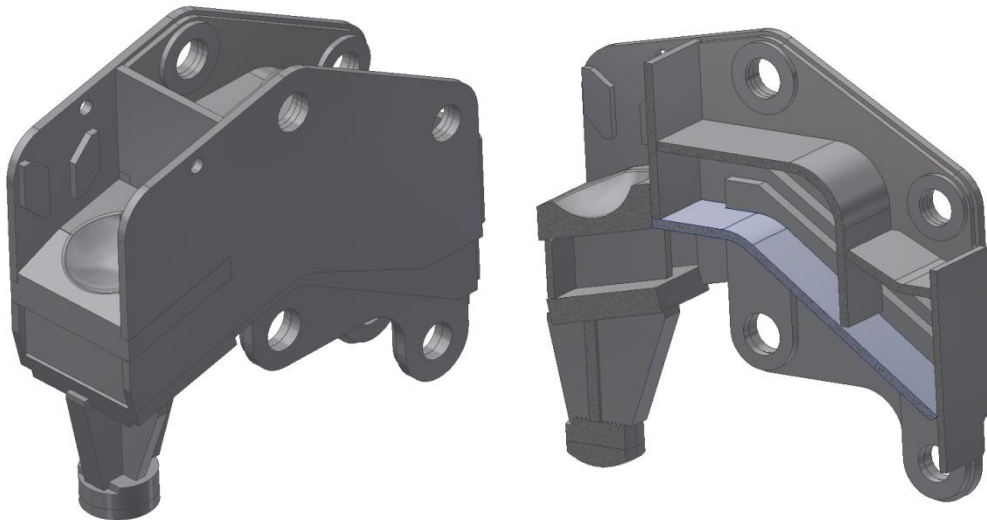
Różnice konstrukcyjne nadstawek wynikają z różnych czynników – konstrukcji samych spągnic, wielkości i kierunków obciążenia przekazywanego przez łączniki lemniskatowe. Nie wszystkie spągnice użytkowanych sekcji obudowy były konstruowane z założeniem ich późniejszego doposażenia w nadstawki. Stąd konstrukcje nadstawek są mniej lub bardziej skomplikowane. Zastosowanie nadstawek spągnicy wiąże się z koniecznością sprawdzenia w jakim stopniu nadstawki zmieniają dotychczasowe obciążenia zespołów sekcji obudowy. Z doświadczenia konstruktorów ITG KOMAG wynika, że podniesienie gniazda posadowienia stojaka hydraulicznego wraz z punktami przyłączenia łączników lemniskatowych, zwiększa obciążenie spągnicy w większym stopniu, niż w przypadku pozostawienia gniazda posadowienia stojaka bez zmian. Niemniej w każdym przypadku modernizacji sekcji obudowy podlega ona badaniom zgodnym z wymaganiami norm i certyfikacji.

Same nadstawki spągnicy są weryfikowane pod względem wytrzymałościowym. W ITG KOMAG, do podstawowej analizy wytrzymałościowej elementów konstrukcyjnych sekcji obudowy zmechanizowanej wykorzystuje się moduł obliczeniowy, oparty o metodę elementów skończonych MES [10, 11], programu Autodesk Inventor Professional. Analiza pozwala m.in. na określenie rozkładu wartości naprężenia zredukowanego von Misesa w oparciu o hipotezę wytrzymałościową energii odkształcenia postaciowego, sformułowaną w 1904 r. przez Maksymiliana T. Hubera oraz niezależnie, w 1913 r. przez Richarda von Misesa i w 1924 r. przez Heinricha Hencky'ego. Stąd hipoteza znana jest jako hipoteza H-M-H. Hipoteza zakłada, że ciało jest doskonale sprężyste i że praca naprężenia zredukowanego równa jest sumie prac wszystkich naprężeń składowych. Zależność naprężenia zredukowanego określona jest wzorem (1).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}} \quad (1)$$

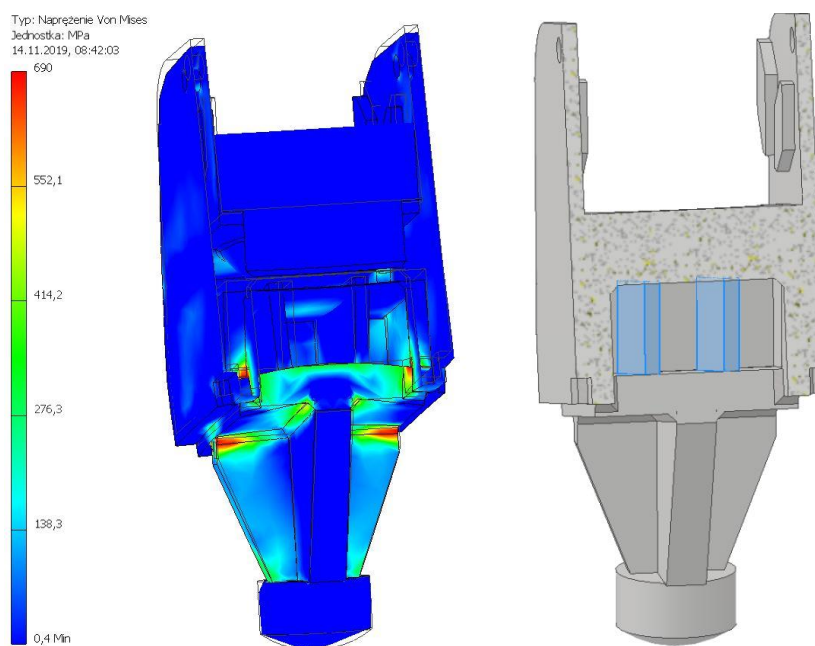
gdzie: σ_x , σ_y i σ_z – naprężenia główne względem osi x, y, z

ITG KOMAG otrzymał, od jednego z producentów sekcji obudowy, model zaprojektowanej przez niego nadstawki spągnicy, z zadaniem jej weryfikacji wytrzymałościowej i ewentualnego wprowadzenia zmian konstrukcyjnych. Wraz z modelem producent przekazał informacje dotyczące obciążenia nadstawki. Masa nadstawki wynosiła ~1950 kg. Model 3D tej nadstawki przedstawia rysunek 8.



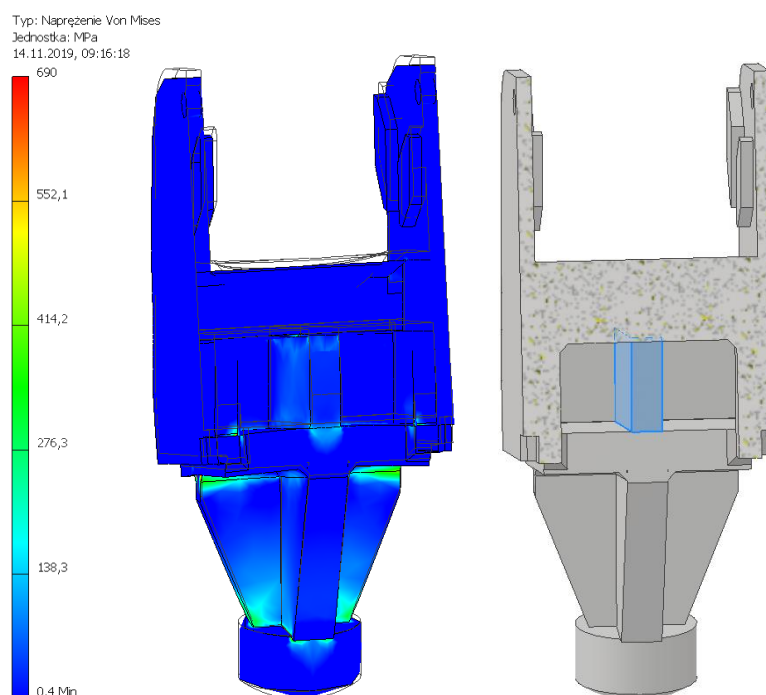
Rys. 8. Model 3D nadstawki poddanej analizie
(Model 3D producenta sekcji obudowy zmechanizowanej)

Pierwsze obliczenia numeryczne za pomocą metody elementów skończonych (MES) ujawniły znaczne wartości naprężenia von Misesa (7186 MPa), zlokalizowane głównie w górnej części elementu wsporczego podniesionego gniazda stojaka. Na rysunku 9 pokazano rozkład wartości naprężenia von Misesa w modelu nadstawki. Dla lepszego zobrazowania naprężenia skalę kolorów ograniczono do wartości naprężenia 690 MPa, właściwego dla materiału (stal S690Q), z którego przewidziano wykonanie nadstawki. Analiza odkształcenia modelu pod wpływem obciążenia wykazała, że tak duże wartości naprężenia wynikają z niewłaściwego podparcia gniazda stojaka na górnej blasze elementu wsporczego. Główna blacha pionowa tego elementu przekazuje obciążenie na gniazdo stojaka poprzez blachę górną i dwa żebra. Umożliwia to ugięcie blachy górnej elementu i wzrost naprężenia głównie w spoinach łączących blachy.



Rys. 9. Rozkład wartości naprężenia von Misesa w modelu nadstawki oraz układ podparcia gniazda stojaka

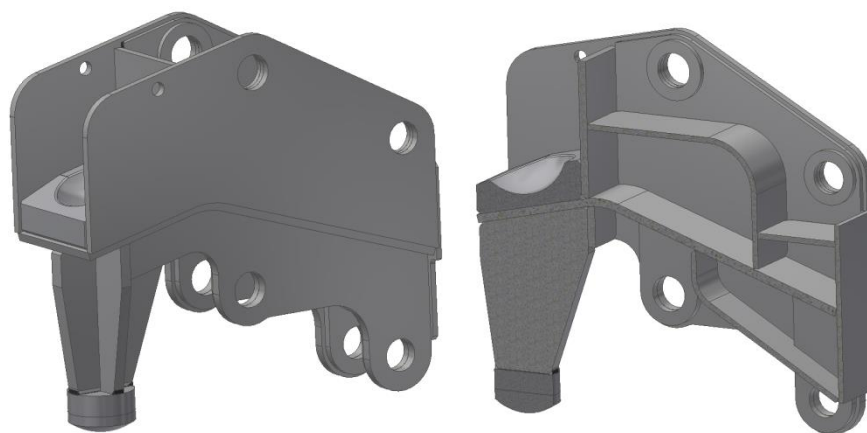
W celu obniżenia naprężenia w pierwszej kolejności zastąpiono dwa żebra podpierające gniazdo stojaka, jednym żebrem ustawionym w linii z główną blachą pionową elementu wsporczego gniazda (rys. 10). Model ponownie poddano obliczeniom MES, uzyskując obniżenie wartości maksymalnego naprężenia zredukowanego von Misesa do wartości 2830 MPa – obniżenie o około 60%. Masa nadstawki pozostała bez zmian. Rozkład naprężenia zredukowanego von Misesa pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Rozkład naprężenia zredukowanego von Misesa w modelu nadstawki po modyfikacji oraz układ podparcia gniazda stojaka

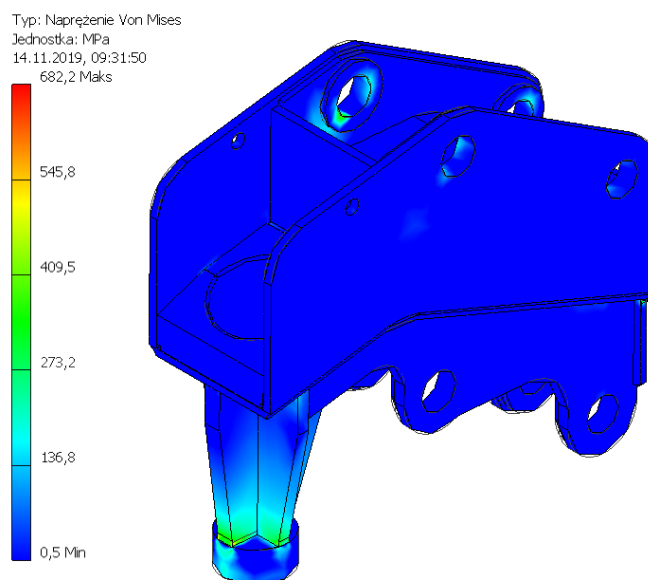
Naprężenie nadal jednak koncentrowało się głównie w spoinach łączących poszczególne blachy elementu wsporczego, a jego wartość z pewnością spowodowałaby zniszczenie tych spoin. Podjęto więc decyzję o opracowaniu własnej konstrukcji nadstawki. W konstrukcji tej wyeliminowano

poziomą blachę pośrednią i żebra w układzie podparcia gniazda stojaka. Usunięto również układ kilku dużych nakładek w strefie otworów łączących nadstawkę ze spągnicą, zastępując je lokalnymi nakładkami wzmacniającymi same strefy otworów. Pozostałe blachy nadstawki pozostawiono w wykonaniu zbliżonym do pierwotnego. Model nadstawki po wprowadzeniu opisanych zmian przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Model 3D nadstawki po zmianach konstrukcyjnych

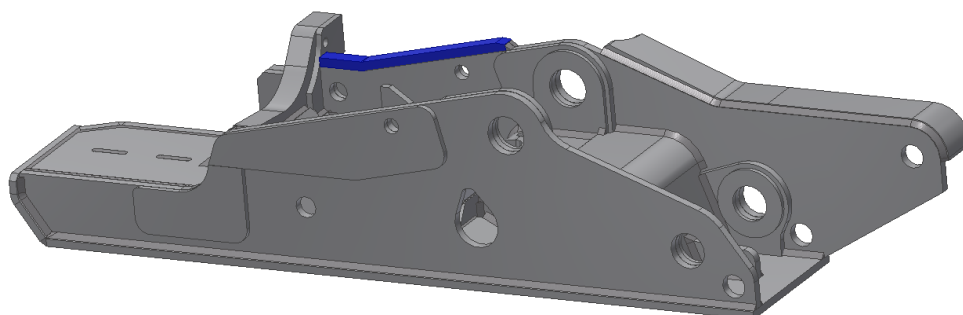
Wprowadzone zmiany pozwoliły na zmniejszenie masy nadstawki o około 340 kg do wartości około 1610 kg. Wyeliminowano również, występujące w pierwotnym nadstawki, zbyt ciasne (bez luzu) dopasowanie nadstawki do spągnicy, co mogłoby uniemożliwić montaż nadstawek na części spągnic sekcji przewidzianych do modernizacji. Zmodyfikowaną nadstawkę poddano analizie MES uzyskując maksymalne naprężenia zredukowanego von Misesa na poziomie 680 MPa, zatem poniżej granicy plastyczności materiału, z którego nadstawka ma zostać wykonana (stal S690Q). Rozkład naprężenia zredukowanego von Misesa w zmodyfikowanym modelu nadstawki przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Rozkład naprężenia zredukowanego von Misesa w modelu nadstawki po zmianach konstrukcyjnych

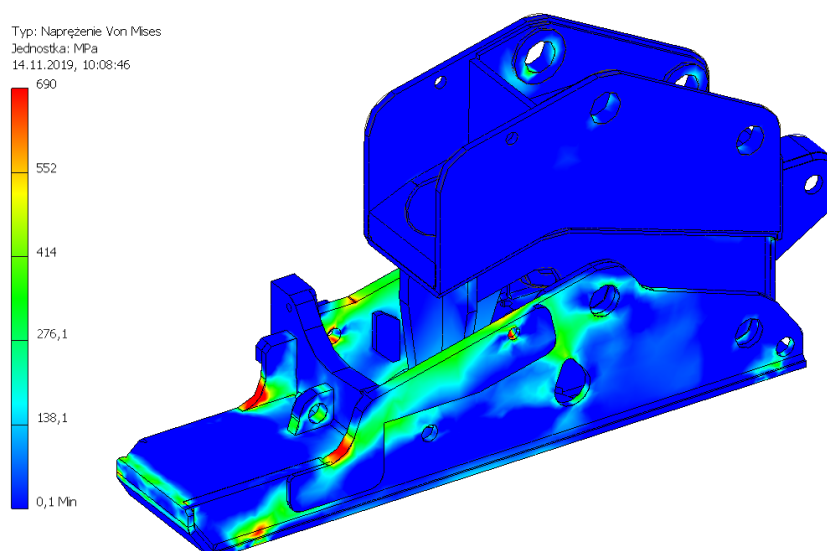
W ramach prowadzonych analiz sprawdzono również wpływ zastosowania nadstawki spągnicy na wytrzymałość samej spągnicy, gdyż jak wcześniej wspomniano, podniesienie gniazda posadowienia stojaka hydraulicznego powoduje zwiększenie obciążenia spągnicy. Siły przekazywane z nadstawki i stojaka na spągnicę są takie same w przypadku nadstawki wg pierwotnego i nadstawki po zmianach

konstrukcyjnych. Analizę numeryczną MES przeprowadzono z wykorzystaniem nadstawki po modyfikacjach. Już pierwsze obliczenia wykazały konieczność wzmocnienia wewnętrznego tężnika spągnicy. Model spągnicy z blachą wzmacniającą (oznaczoną kolorem niebieskim) przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Wzmocnienie konstrukcji spągnicy

Tak przygotowany model spągnicy poddano dalszej analizie MES wraz z nadstawką. Na rysunku 14 pokazano rozkład naprężenia von Misesa w połączonych modelach spągnicy i nadstawki.



Rys. 14. Rozkład naprężenia von Misesa w zespole elementów spągnica-nadstawka

Analiza ujawniła miejsca wystąpienia naprężenia zredukowanego von Misesa o wartości dochodzącej do 1273 MPa. Naprężenie takie występuje jednak tylko na powierzchni blach, a nie w spoinach. Można zatem dopuścić odstępnie od dalszych modyfikacji konstrukcji spągnicy.

3. Podsumowanie

Wraz ze zmniejszaniem liczby podziemnych zakładów górniczych w zasobach czynnych kopalń pojawia się nadmiar sekcji obudowy zmechanizowanej. Z uwagi na obserwowany w ostatnim czasie drastyczny wzrost cen materiałów konstrukcyjnych zakłady górnicze chętniej sięgają po starsze sekcje obudowy. Nie zawsze są one bezpośrednio przygotowane do zastosowania w kolejnych ścianach, nawet po remoncie. Często potrzebne są sekcje obudowy o innym zakresie wysokości roboczej. W takim przypadku wyjściem jest modernizacja posiadanych sekcji. Najczęściej modernizacja polega na podwyższeniu zakresu wysokości roboczej poprzez zastosowanie nadstawek spągnicy i wydłużeniu bądź wymianie stojaka hydraulicznego. Połączenie modernizacji z remontem elementów podstawowych sekcji obudowy jest rozwiązaniem tańszym niż zakup sekcji nowych.

W rozdziale przedstawiono przesłanki prowadzące do podejmowania modernizacji sekcji obudowy oraz przybliżono sposoby modernizacji polegającej na podwyższeniu zakresu wysokości roboczej sekcji obudowy. Przewiedziono przykłady konstrukcyjne nadstawek spągnicy oraz proces weryfikacji wytrzymałościowej takich nadstawek. Na konkretnym przykładzie pokazano, że powierzenie prac konstrukcyjnych w tym zakresie profesjonalnej, doświadczonej firmie, jaką jest ITG KOMAG, pozwala nie tylko uzyskać spełniającą kryteria wytrzymałościowe konstrukcję, ale również uzyskać znaczące oszczędności procesu modernizacji. W przedstawionym przykładzie wprowadzonych zmian konstrukcyjnych w nadstawce zaprojektowanej przez jednego z producentów, oszczędność materiału (stali) wyniosła około 340 kg na jednej sztuce nadstawki. W przypadku modernizacji kompletu obudowy składającego się np. ze 120 sekcji oszczędności wyniosą około 81 ton stali. Biorąc pod uwagę również zmniejszenie procesów spawania oszczędności na jednym komplecie ścianowym obudowy przekroczą 1,5 mln zł.

Literatura

1. <https://www.money.pl/gospodarka/polska-weglowa-potega-grafika-robi-wrazenie-6671165783341568a.html> (dostęp: 15.09.2021)
2. <https://polskirynekwegla.pl/raport-dynamiczny/wydobycie-i-sprzedaz-wegla-kamiennego-ogolem> (dostęp: 15.09.2021)
3. <https://polskirynekwegla.pl/raport-dynamiczny/stan-zatrudnienia> (dostęp: 15.09.2021)
4. <https://polskirynekwegla.pl/raport-dynamiczny/stan-zapalow-wegla-kamiennego-caly-okres-czasu> (dostęp: 15.09.2021)
5. Szyguła M., Stępor J., Mostek W, Lebda-Wyborny Z., Kazubiński D.: Dostosowanie sekcji obudowy zmechanizowanej HYDROMEL-16/35-POz do zmieniających się warunków eksploatacji. Masz. Gór. 2017 nr 1 s. 31-44, ISSN 2450-9442
6. Szweda S., Szyguła M., Mazurek K.: Czynniki wpływające na postać konstrukcyjną i parametry techniczne sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej. Część 1. Czynniki naturalne, techniczne i konstrukcyjne. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2016, s. 1-168; 8,42 ark. wyd.; ISBN 978-83-65593-01-6
7. Kostyk T.: Remont i modernizacja sekcji zmechanizowanych obudów ścianowych w aspekcie warunków utrzymywania wyrobisk wybierkowych, WUG: bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie, 5/1999, s. 16-20, BSL6-0001-0003
8. Szyguła M.: Rozwój konstrukcji sekcji obudowy zmechanizowanej w górnictwie węgla kamiennego w Polsce. Masz. Gór. 2013 nr 2 s. 30-38, ISSN 0209-3693
9. Malec, M., Zając R.: Harmonization of technical requirements in the scope of machines for underground mines. Min. Mach. 2021, nr 2, s. 44-52, DOI:10.32056/KOMAG2021.2.5, ISSN 2719-3306
10. Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji, January 2016, Edition: 3rd, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN: 978-83-7814-471-7
11. Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; Zhu, J.Z. The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals, 7th ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2013. ISBN 9781856176330