

Określenie wpływu warstwy antykorozyjnej na wytrzymałość łańcuchów ogniowych -górnich.

Mariusz Szot

Streszczenie:

Eksploatacja łańcuchów ogniowych górniczych wiąże się z właściwym sposobem wyboru stosowanego łańcucha. Parametry użytkowe łańcucha wiążą się z ryzykiem dla pracowników obsługujących układy odstawy z wykorzystaniem przenośników zgrzeblowych. Pełna analiza parametrów użytkowych możliwa jest po przeprowadzeniu odpowiednich badań. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych oraz badań modelowych, które pozwoliły na określenie wpływu zabezpieczenia antykorozyjnego powierzchni łańcucha na jego parametry użytkowe.

Słowa kluczowe: Transport, Łańcuch, Siła zrywająca, Wydłużenie

1. Wprowadzenie

W związku z koncentracją wydobycia producenci urządzeń dostarczają kompletne ciągi odstawy urobku od ściany na powierzchnię. Optymalnie dobrane prędkości, szerokości przenośników, wielkości łańcucha pozwalają uzyskać wysoką wydajność. Dlatego tak ważnym problemem jest właściwy dobór łańcucha o odpowiednich parametrach wytrzymałościowych i geometrycznych spełniających oczekiwania użytkowników.

Łańcuchy ogniowe górnicze używane w przemyśle wydobywczym nie są poddawane badaniom obligatoryjnym wynikającymi z obowiązujących obecnie przepisów. Poddane są natomiast badaniom sprawdzającym na poziomie produkcji. Jednym z podstawowych badań określonych przez normy PN-G-46701 z kwietnia 1997 i DIN 22 252:2001-09 jest wykonanie statycznej próby obciążenia łańcucha aż do zerwania celem sprawdzenia parametrów wytrzymałościowych. W Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych GIG w latach 1980-1982 została wdrożona nowa tematyka badań związana z badaniami łańcuchów ogniowych-górnich. Początkowo zakres tych badań dotyczył prób rozciągania łańcucha i wyznaczania całkowitej siły zrywającej i określenia wydłużenia całkowitego. W kolejnych latach wraz z ukazującymi się normami i opracowaniami zakres badań był rozszerzany i dostosowywany do potrzeb producentów i eksploatorów łańcuchów w ten sposób aby, były użyteczne dla personelu inżyniersko – technicznego. Zakres badań oraz zainteresowanie tym ciekawym tematem wynika z

sporów pomiędzy producentami a użytkownikami łańcuchów o obniżenie parametrów użytkowych łańcuchów zabezpieczonych antykorozyjnie na poziomie produkcji. W latach poprzednich łańcuchy były dostarczane odbiorcom w stanie tzw. naturalnie czarnym, tzn. z powierzchnią pokrytą zgorzeliną, która powstaje w wyniku obróbki termicznej, bez jakiegokolwiek zabezpieczenia antykorozyjnego. Ponieważ taka powierzchnia pokrywa się nalotem rdzy już po kilku dniach, obecnie producenci zabezpieczają łańcuchy na okres transportu oraz składowania substancjami na bazie wosku, np. tectylem. Łańcuchy, które są użytkowane w agresywnym środowisku kopalnianym sprzyjającym korozji, zabezpiecza się w procesie cynkowania ogniowego. Podczas cynkowania ogniowego na powierzchni ogniów tworzy się powłoka ochronna składająca się z dwóch warstw: stopu żelazo-cynk i zewnętrznej warstwy zastygłego cynku. Pokrycie łańcucha warstwą antykorozyjną zmienia współczynnik tarcia pomiędzy poszczególnymi ogniwami podczas próby zrywania. W praktyce ruchowej występują zmienne obciążenia dynamiczne, powstałe w wyniku różnorodnych blokad łańcucha prowadzonego w rynnach spowodowanych nagłymi obwałami stropu, kolizjami z elementami innych urządzeń ścianowych lub z powodu nieprawidłowego wstępnego naprężenia łańcucha. Dla pełnego wyjaśnienia zjawisk zachodzących w łańcuchu podczas jego pracy niezbędnym jest uzupełnienie badań statycznych badaniami dynamicznymi. Badania te również mogą być pomocne przy właściwym doborze łańcucha do określonych warunków jego stosowania badania te zostały opisane w pracach [1,2].

2. Badania wytrzymałościowe łańcuchów.

Badanie rozciągania próbek łańcucha ogniowego jest badaniem złożonym. Oprócz typowego rozciągania, mamy do czynienia również ze współpracą ogniów łańcucha na łukach. Zachodzi tutaj zginanie oraz tarcie powierzchniowe. Grubość warstwy wierzchniej powstałej podczas obróbki mechanicznej (śrutowanie) oraz obróbki cieplno-powierzchniowej lub cieplno-chemicznej może wynosić nawet kilka milimetrów. Analiza wielkości uzyskanych z przeprowadzonych badań pozwala na sformułowanie wniosku, że łańcuchy z niskimi współczynnikami tarcia w przegubach uzyskanymi w wyniku smarowania, lub antykorozyjnej ochrony powierzchni ogniów mają niższe parametry w zakresie:

- siły zrywającej,
- wydłużenia.

Zjawisko to zostało uwzględnione w zapisach normy DIN 22 252:2001-09 dopuszczające obniżenie siły zrywającej łańcuchów zabezpieczonych antykorozyjnie o 10% i wydłużenia o 20% w odniesieniu do wartości podanych w normie. Norma polska PN-G-46701 nie posiada takiego zapisu, stąd ciągle spory pomiędzy producentami a odbiorcami.

W wyniku stosowania powłok antykorozyjnych na ogniwach łańcuchów górniczych zachodzi tzw. efekt Rebindera polegający na rozsadzającym działaniu przenikających cząsteczek substancji powierzchniowo-aktywnych do wnętrza warstwy wierzchniej metalu co zostało opisane w pracach [1, 2]. Zakłada się zmniejszenie wymagań dla siły zrywającej o 10%, a dla wydłużenia łańcuchów o 20% w stosunku do łańcuchów w stanie surowym.

3. Wyniki badań laboratoryjnych.

Najwięcej istotnych danych uzyskuje się z badań doświadczalnych prowadzonych na próbkach przy zastosowaniu probabilistycznych metod opracowania ich wyników. Dostarcza to wielu nowych informacji o ilościowym i jakościowym wpływie różnych czynników na własności mechaniczne łańcuchów, a uzyskane dane mogą zostać wykorzystane do tworzenia modeli matematycznych. Dla tego też dla potrzeb pracy przeprowadzono ciąg badań celem określenia tak podstawowych wielkości jak maksymalne obciążenie zrywające i wydłużenie dla tego obciążenia. Badania te polegały na zrywaniu łańcuchów surowych i pokrytych warstwą Tectyl - em.

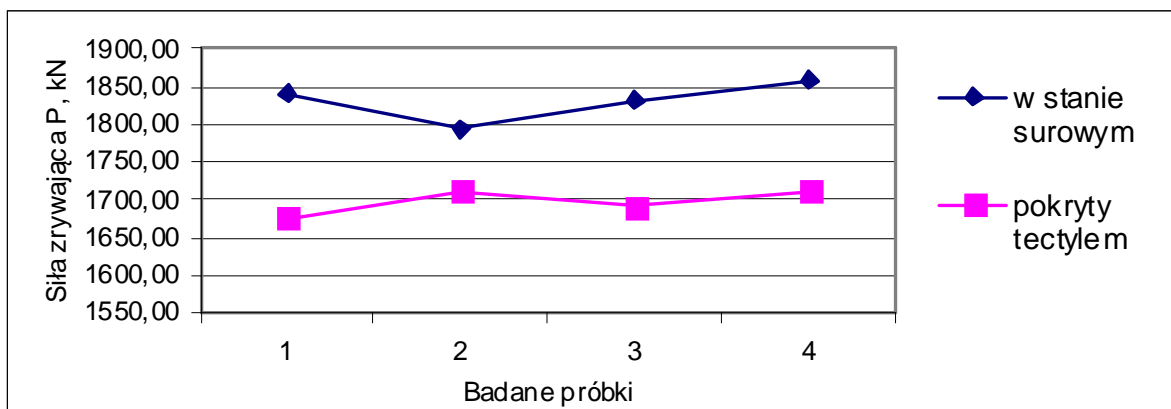
W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla próbek łańcucha 34x126 klasy D. Zostały one pobrane z jednej partii produkcyjnej, część z nich została pokryta warstwą Tectyl - u.

Tabela 1 Wyniki statycznych prób rozciągania.

Próbki w stanie surowym			Próbki pokryte Tectylem		
Nr próbki	Siła zrywająca [kN]	Wydłużenie %	Nr próbki	Siła zrywająca [kN]	Wydłużenie %
06-168-2	1840,3 ±20,6kN	19,7 %	06-168-1	1677,3 ±18,7kN	13,0 %
06-168-3	1794,8 ±20,0kN	17,5 %	06-168-6	1713,0 ±19,1kN	12,9 %
06-168-4	1833,1 ±20,5kN	17,5 %	06-168-7	1691,3 ±18,9kN	13,4 %
06-184-5	1858,2 ±20,8kN	22,1 %	06-168-8	1711,4 ±19,1kN	11,8 %
Średnio:	1831,6 kN	17,7%	Średnio:	1698,2 kN	12,8%

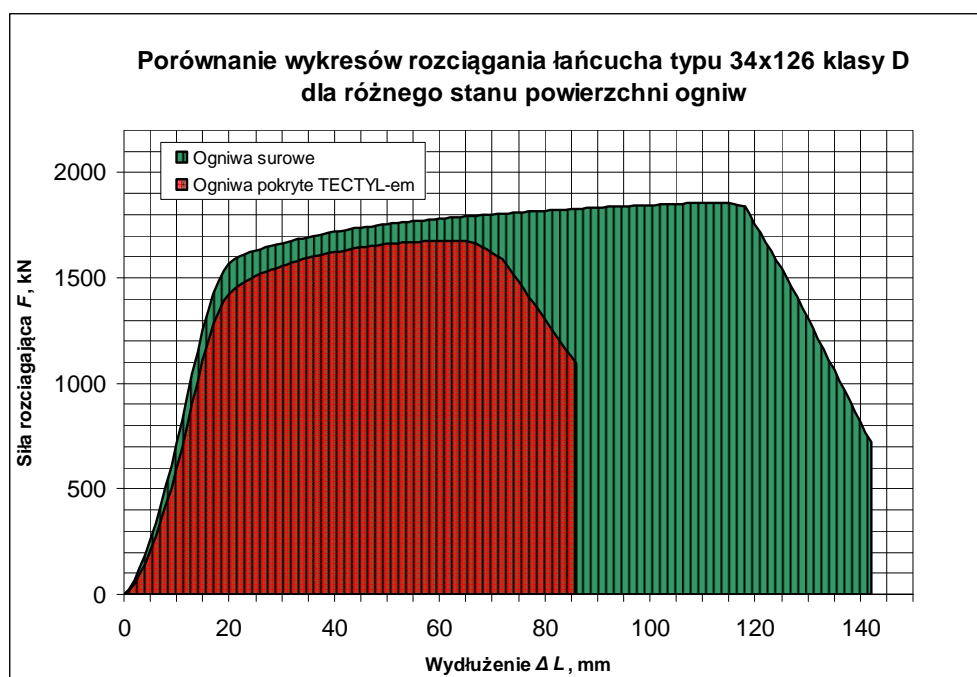
Podobnie jak w przypadku cienkich elementów linowych, na wykresach rozciągania łańcuchów (rys. 2, aż do zerwania $P_L=f(\Delta L)$) nie występuje wyraźna granica plastyczności R_e . Ze względu na znaczne wydłużenie łańcuchów fabrycznie nowych, nie można również wyznaczyć umownej granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności jak w przypadku drutów lub prętów.

Dokonując oceny ilościowej otrzymanych wyników badań możemy zauważyć spadek zarówno siły zrywającej wykres (rys. 1) jak i wydłużenia. Błędy przypadkowe pomiarów oraz rozrzut sił jak i wydłużenia łańcuchów tego samego rozmiaru, spowodowane są czynnikami przypadkowymi występującymi w złożonym procesie produkcyjnym.



Rysunek 1. Zależność wielkości siły zrywającej dla próbek nie zabezpieczonych i zabezpieczonych antykorozyjnie.

Z otrzymanych wykresów z badań dla poszczególnych próbek obliczono pracę zerwania, której graficzną interpretację przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Zależność $F(\Delta l)$

Pole zakreślone pod krzywą możemy wyrazić wzorem 1:

$$W = \int_0^l Fdl \quad (1)$$

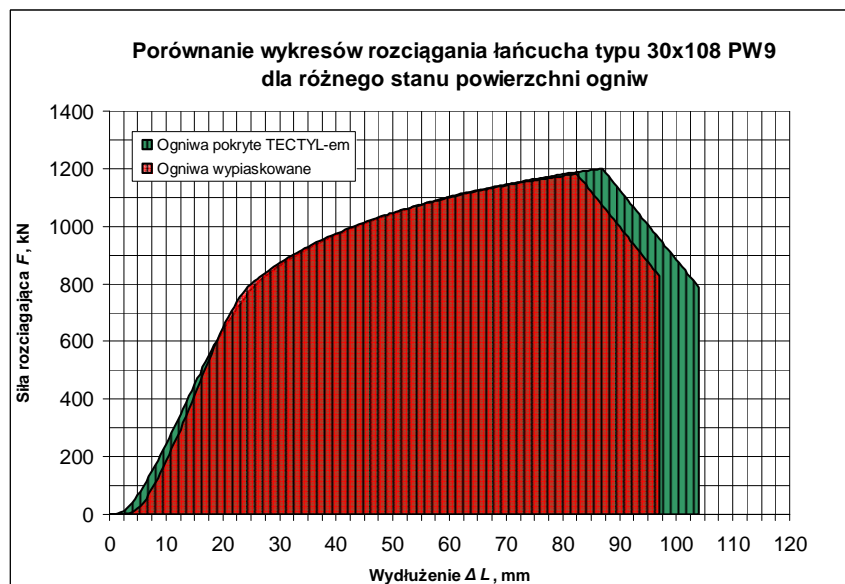
W przypadku statycznej próby rozciągania praca jest procesem związanym ze zmianą energii potencjalnej w energię kinetyczną i energię cieplną. Analizując graficzną interpretację wyników statycznej próby obciążenia bez zastosowania metod matematycznych oceny możemy zauważyć spadek pracy zerwania. Spowodowane jest to zmniejszeniem wartości przyłożonej siły jak i przyrostu wydłużenia. W tabeli nr 2 zamieszczono obliczone wartości pracy zerwania dla poszczególnych próbek łańcucha. Wyliczając wartości średnie dla danej populacji łańcucha widoczny jest spadek o 38,38% średniej pracy zerwania. Praca zerwania określa zdolność łańcucha do przyjęcia energii i jej rozproszenia w trakcie pracy przenośnika.

Tabela 2 Wartości pracy zerwania dla poszczególnych badań.

Próbki w stanie surowym			Próbki pokryte Tectylem		
Nr próbki	Siła zrywająca [kN]	Praca zerwania [kJ]	Nr próbki	Siła zrywająca [kN]	Praca zerwania [kJ]
06-168-2	1840,3 ±20,6kN	189,8	06-168-1	1677,3 ±18,7kN	115,9
06-168-3	1794,8 ±20,0kN	168,4	06-168-6	1713,0 ±19,1kN	119,2
06-168-4	1833,1 ±20,5kN	177,4	06-168-7	1691,3 ±18,9kN	119,9
06-184-5	1858,2 ±20,8kN	220,2	06-168-8	1711,4 ±19,1kN	110,7
Średnio:	1831,6 kN	188,95	Średnio:	1698,2 kN	116,43

Według zapewnień producentów łańcuchów po usunięciu warstwy ochronnej zabezpieczającej łańcuch, jego dwa parametry takie jak siła zrywająca i wydłużenie powinny wrócić do poprzednich wartości. Dlatego przeprowadzono dodatkowe badania, poddając obciążeniu łańcuch zabezpieczony antykorozyjnie i oczyszczony metodą

piaskowania łańcuch z tej samej partii produkcyjnej. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3. W przypadku tym łańcuch również nie zachowuje swych parametrów zgodnie z zapisem normowym dotyczącym ich dopuszczalnych wartości. Co może być spowodowane utrzymaniem takiej samej wartości współczynnika tarcia jak dla próbki pokrytej warstwą antykorozyjną.



Rysunek 3 Porównanie prób zerwania łańcucha zabezpieczonego antykorozyjnie i z usuniętą warstwą antykorozyjną.

4. Analiza numeryczna

Dla weryfikacji badań laboratoryjnych wykonano analizy numeryczne łańcucha górniczego, określające wpływ współczynnika tarcia μ pomiędzy ogniwami na wytrzymałość łańcucha na rozciąganie. Wykonano model numeryczny łańcucha górniczego 18x64, który poddany został analizom wytrzymałościowym w oparciu o Metodę Elementów Skończonych.

4.1 Badania modelowe

Modelowe badania wytrzymałościowe przeprowadzono numerycznie metodą elementów skończonych (MES, ang. FEM) [3,4]. Istotą tej metody jest podział (dyskretyzacja) złożonego układu na skończoną liczbę elementów, następnie analiza pojedynczego elementu, którego zachowanie jest określone przez skończoną liczbę parametrów i ponowne złożenie wszystkich elementów w celu badania odpowiedzi całego układu. Główne założenia metody bazują na tym, iż łatwiej jest zbadać i

zrozumieć odpowiedź pojedynczego elementu, a następnie złożyć układ w celu badania jego odpowiedzi, niż badać układ w całości [5,7].

Z punktu widzenia użytkownika, modelowanie we współczesnych systemach MES sprowadza się do wprowadzenia geometrii całego badanego układu oraz określenia parametrów poszczególnych jego części, takich jak własności materiałowe, parametry przekrojowe, a w przypadku analizy nieliniowej krzywe materiałowe. Geometrię układu można zadać tworząc ją, bądź importując gotową z programów CAD. Uciążliwa dyskretyzacja, zwłaszcza w przypadku skomplikowanych modeli, dokonywana jest często w sposób automatyczny lub półautomatyczny, pod kontrolą użytkownika. Po wprowadzeniu potrzebnych parametrów wejściowych konieczne jest określenie sposobu obciążenia i podparcia modelu. W wyniku obliczeń otrzymuje się między innymi wartości sił wewnętrznych przeliczanych automatycznie na naprężenia zredukowane.

Programy komputerowe działające w oparciu o algorytm MES, oprócz przemieszczeń i sił wewnętrznych, automatycznie obliczają naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego, zgodnie z ogólną zależnością [6,7]:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (2)$$

Porównując uzyskane wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych z wartościami dopuszczalnymi dla danego materiału można w prosty, niedrogi i nieniszczący sposób uzyskać odpowiedź na pytanie o poprawność zaprojektowanej konstrukcji. Dlatego też naprężenia zredukowane według wyżej wspomnianej hipotezy są najczęściej używanym kryterium wytrzymałościowym przy obliczaniu konstrukcji z wykorzystaniem analizy MES.

4.2 Analiza wytrzymałościowa

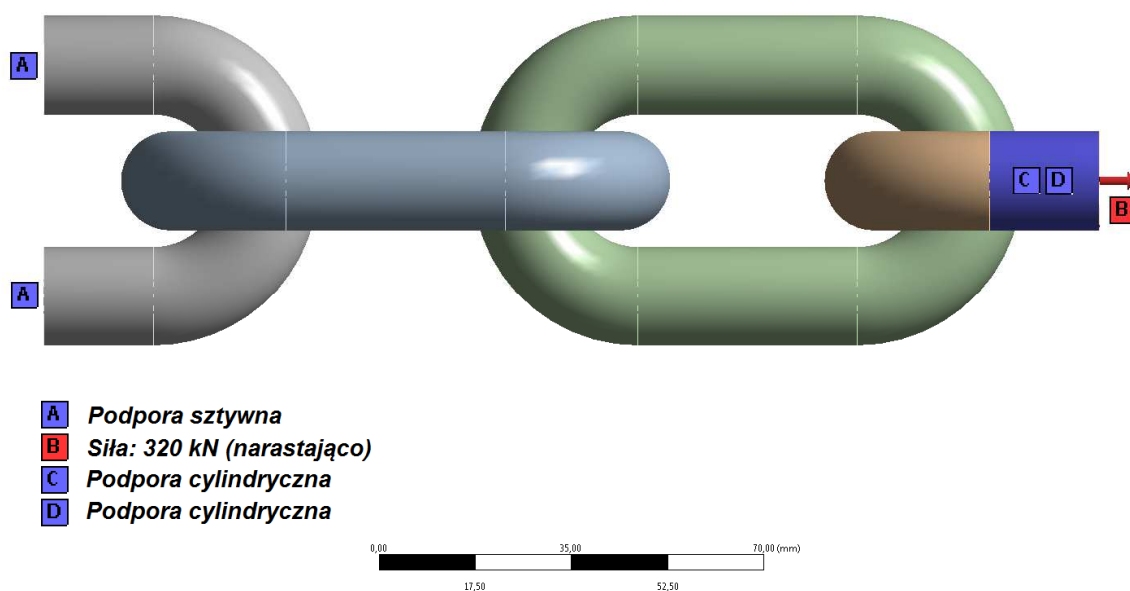
Analizy numeryczne przeprowadzono dla modelu łańcucha górniczego okrągłego w rozmiarze 18x64, zgodnego z normą PN-G-46701. Model obejmował dwa pełne ogniwa i dwie połówki ogniw, do których przyłożono warunki brzegowe (rysunek 4). Tak zbudowany model wykluczył wpływ podparcia (zasada de Saint-Venanta) na wyniki dla dwóch środkowych ogniw.

Analizy miały za zadanie oddać istotę próby stanowiskowej rozciągania łańcucha, przy uwzględnieniu zmienności parametru współczynnika tarcia μ . Współczynnik ten był

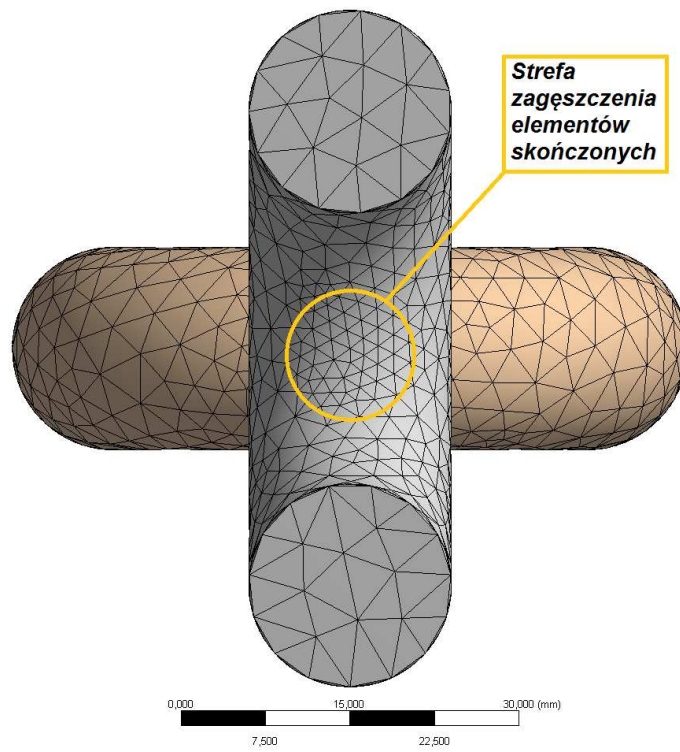
jedyną zmienną w kolejnych analizach, co wykluczyło wpływ innych czynników na ostateczne wyniki. Dodatkowo, w celu poprawienia zbieżności wyników, zagęszczono siatkę elementów skończonych w obszarach kontaktu pomiędzy ogniwami (rysunek 5).

Materiał zaimplementowany do analizy odpowiadał normowemu gatunkowi stali wykorzystywanemu na ogniwa łańcuchów górniczych, według specyfikacji znajdującej się w normie DIN 17115. Do analiz przyjęto model materiałowy, charakteryzujący w sposób biliniowy parametry normowe stali w gatunku S355J2+N. Na rysunku 6 pokazano wykres stworzony w oparciu o charakterystykę materiałową gatunku stali uwzględnionego w analizie, natomiast tabela 3 zawiera podstawowe dane użyte do utworzenia powyższego wykresu. Pierwsza linia na wykresie (od 0 do R_e) odpowiada pracy materiału w zakresie sprężystym, druga linia natomiast (od R_e do R_m) charakteryzuje pracę materiału w zakresie plastycznym.

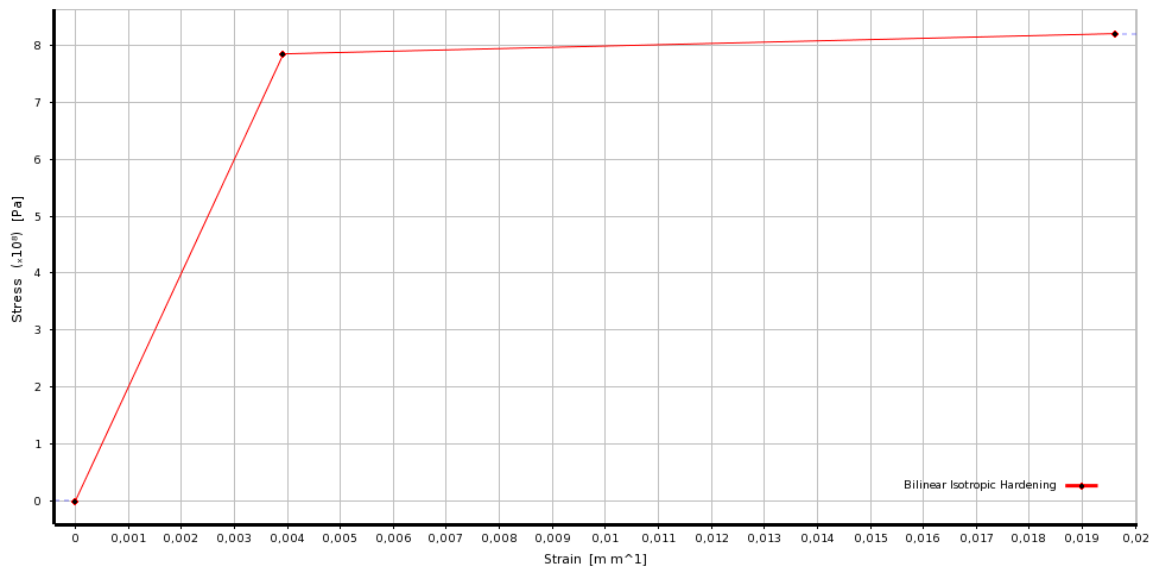
Ze względu na charakter analiz, a także brak dokładnej charakterystyki materiałowej, jako punkt porównawczy przyjęto wyniki dla siły rozciągającej równej 320 kN. We wszystkich przypadkach próbek badanych doświadczalnie na rozciąganie siła ta nie powodowała zniszczenia próbki.



Rysunek 4. Widok ogólny modelu łańcucha górniczego okrągłego 18x64 wraz z warunkami brzegowymi



Rysunek 5. Widok siatki elementów skończonych; widoczne miejsce zagęszczenia siatki w obszarze kontaktu pomiędzy ogniwami



Rysunek 6. Model materiałowy stali gatunku S355J2+N - wykres biliniowy Naprężenie-Odształcenie

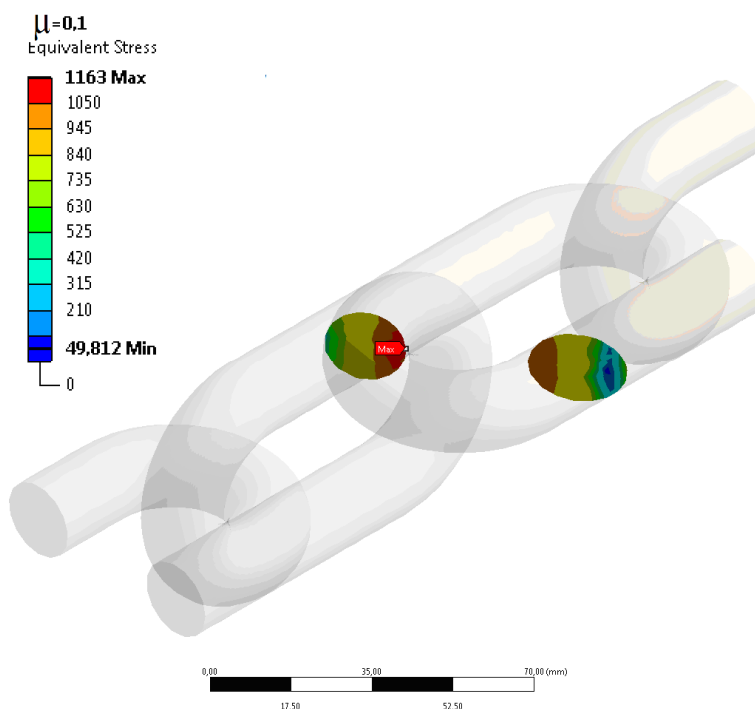
Tabela 3. Dane materiałowe dla stali wykorzystanej w analizach numerycznych

Gatunek stali	Moduł Younga [GPa]	Współczynnik Poissona	Granica plastyczności R_e [MPa]	Moduł styczny [GPa]
S355J2+N	200	0,3	785	2,26

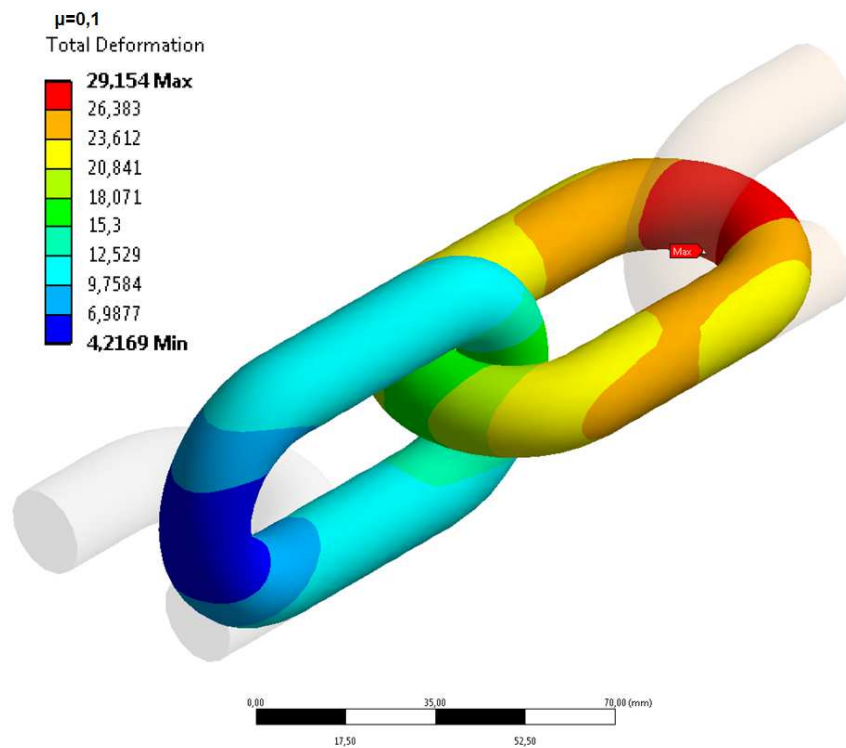
Jak wspomniano powyżej, jako zasadnicze obciążenie łańcucha przyjęto siłę rozciągającą $F = 320$ kN, przyłożoną w sposób narastający w czasie.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano między innymi deformacje modelu, składowe naprężenia i ich rozkład. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych, wyznaczonych według hipotezy Hubera dla jednego z badanych przekrojów. Przykładowe deformacje modelu przedstawiono na rysunku 8.

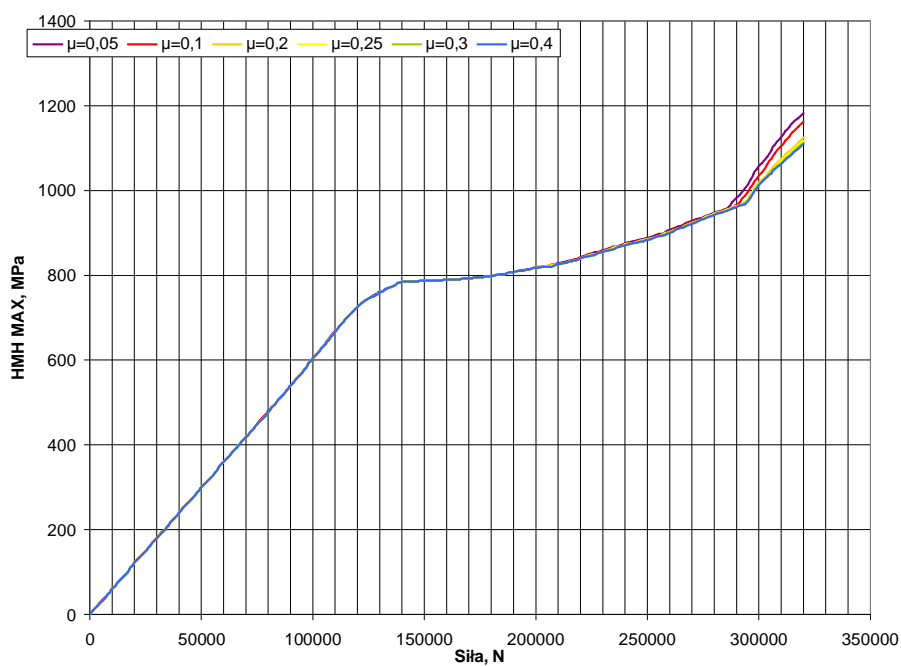
Graficzną interpretację wyników dla wszystkich badanych przypadków pokazano w postaci wykresów na rysunkach 9,10,11 i 12.



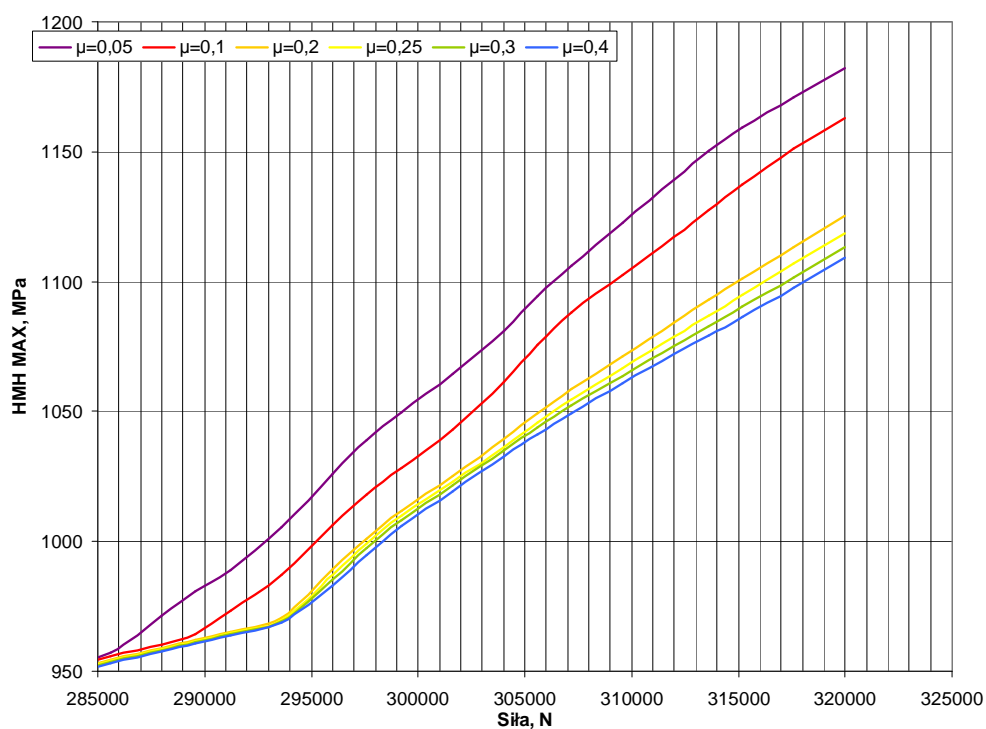
Rysunek 7. Rozkład naprężeń zredukowanych w badanym przekroju ogniwa łańcucha (naprężenia w MPa, bez deformacji)



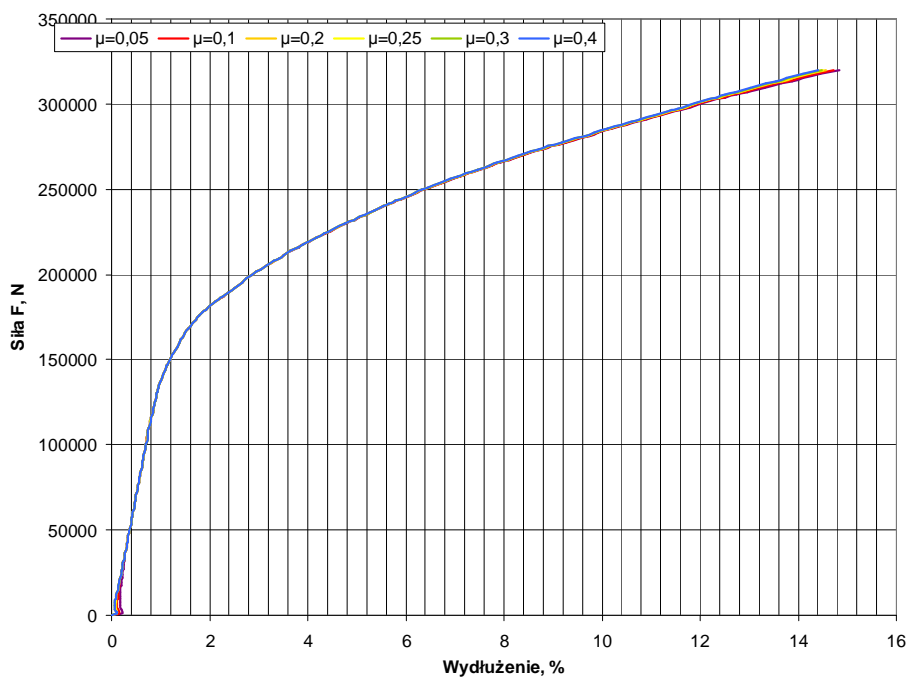
Rysunek 8. Deformacje konstrukcji w badanym układzie ogniów łańcucha (przeszczenie w mm, skala deformacji 10×)



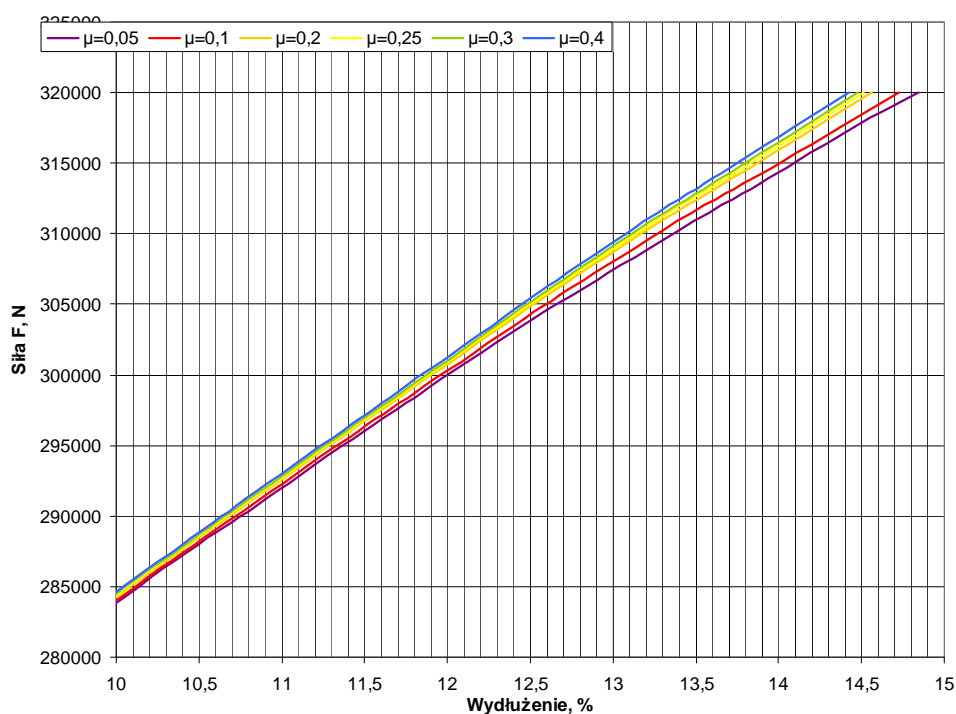
Rysunek 9. Wykres zmiany maksymalnej wartości naprężenia zredukowanego w badanym przekroju w funkcji siły, w zależności od zmiany wartości współczynnika tarcia μ



Rysunek 10. Wykres zmiany maksymalnej wartości naprężenia zredukowanego w badanym przekroju w funkcji siły, w zależności od zmiany wartości współczynnika tarcia μ



Rysunek 11. Wykres siły przenoszonej przez układ kinematyczny w funkcji wydłużenia, w zależności od zmiany wartości współczynnika tarcia μ



Rysunek 12. Wykres siły przenoszonej przez układ kinematyczny w funkcji wydłużenia, w zależności od zmiany wartości współczynnika tarcia μ

5. Sposoby ograniczenia negatywnego skutku zabezpieczenia antykorozyjnego.

Celem weryfikacji analizy modelowej było wykazanie, że istotny wpływ na obniżenie siły zrywającej i wydłużenia ma wartość współczynnika tarcia z równoczesnym wskazaniem, że istnieją środki antykorozyjne ograniczające negatywny wpływ środków konserwujących. Dlatego też zrealizowano dodatkowy cykl badań dla łańcucha 18x64 wykonanego z materiału w gatunku S355J2+N.

Jako środek konserwujący zostały zastosowane dwa środki konserwujące specjalnie opracowane wspólnie z producentem w/w środków antykorozyjnych. Powłoki łańcucha zostały zabezpieczone antykorozyjnie dwoma preparatami AntyCor BPS, dla których otrzymane powłoki różnią się wartością współczynnika tarcia. Równocześnie aby spełnić wymogi producentów łańcuchów określono warunki ich stosowania:

- brak konieczności utrzymania klasy czystości zabezpieczanej powierzchni,
- możliwość nakładania na widoczną korozję,
- dostosowane do pracy w środowisku C5,
- dobra przyczepność powłoki do podłoża,

Badaniom poddano 6 próbek łańcuchów z których próbki:

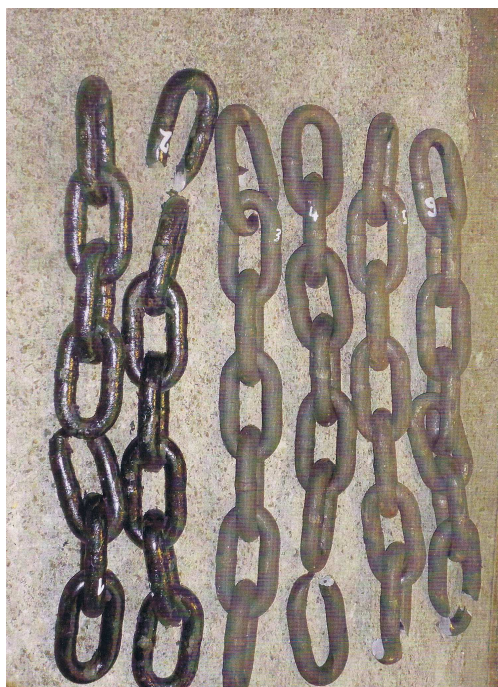
- numery 1 i 2 zostały pokryte środkiem antykorozyjnym AntyCor BPS seria SK

- numerze 3 i 4 zostały pokryte środkiem antykorozyjnym AntyCor BPS seria B-5
- numerze 5 i 6 nie zabezpieczone antykorozyjnie.

Wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 4 próbki po wykonanych badaniach przedstawiono na rysunku 13

Tabela 4 Wyniki badań statycznej próby rozciągania.

Oznaczenie próbki	Seria	Wartość siły zrywającej [kN]	Normowa siła zrywająca [kN]	Zmiana procentowa [%]
6	3	412	410	+ 0,5
5		415	410	+ 1,2
4	2	396	410	- 3,5
3		396	410	- 3,5
2	1	402	410	- 2,0
1		405	410	- 1,2



Rysunek 13. Próbki łańcucha po wykonaniu badań.

Dokonując oceny ilościowej zauważamy, że w przypadku zastosowanych środków antykorozyjnych zachodzi zjawisko obniżenia wartości siły zrywającej, jednak jej

wielkość jest znacząco mniejsza w odniesieniu do łańcuchów zabezpieczonych substancjami na bazie wosku (Tectyl).

4. Podsumowanie i wnioski

W ramach realizacji powyżej omówionej pracy przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych, weryfikujących wpływ zmiany współczynnika tarcia μ pomiędzy ogniwami łańcucha górniczego na jego wytrzymałość na zerwanie. W wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych i badań laboratoryjnych można sformułować wnioski:

- w przebadanym zakresie udało się zaobserwować znaczny wpływ tarcia między - ogniwowego na nośność łańcucha,
- w przypadku badań modelowych szczególnie dużą różnicę zaobserwowano w przedziale pomiędzy $\mu = 0,1$ a $\mu = 0,2$, na maksymalnym badanym pułapie obciążenia zaobserwowano różnicę nośności około 6,5%,
- badania laboratoryjne potwierdzają badania modelowe w ich wyniku stwierdzono różnicę nośności około 6,0%,
- następuje znaczny spadek pracy zerwania dla łańcuchów zabezpieczonych antykorozyjnie 38,4%,
- istnieje możliwość takiego doboru środków antykorozyjnych aby ograniczyć ich negatywny wpływ.

Przeprowadzone badania wykazały, że łańcuchy wykonywane są na ogół w sposób prawidłowy, lecz sposób zabezpieczenia i niejednolite przepisy europejskie powodują problem z właściwą interpretacją wyników badań. Wyniki badań przedstawiono producentom do wykorzystania w procesach produkcyjnych.

Literatura

1. M. Szot, R. Kandzia & G. Philipp, Thiele GmbH & Co. KG, GER A. Pytlik &, "Increasing Operational Reliability by Selecting Suitable Mining Chains Using Tensile Impact Tests." Mining Reporter 2/2009
2. M. Szot, R. Kandzia & G. Philipp, Thiele GmbH & Co. KG, GER A. Pytlik &, „Erhöhung der Betriebssicherheit durch Auswahl geeigneter Bergbauketten mittels Schlagzerreisversuchen“ Gluckauf 5/2009
3. Rusiński E.: Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1994.
4. Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
5. Chmielewski T. Nowak H.: Mechanika budowli. Metoda przemieszczeń. Metoda Crossa. Metoda elementów skończonych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1996.
6. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
7. Szuścik W., Kuczyński J.: Wytrzymałość materiałów (Mechanika modelu ciała odkształcalnego i ciała rzeczywistego). Część I. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
8. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J.: Concepts and applications of finite element analysis. John Wiley & Sons, Inc. USA 2002.