

Dr inż. Piotr Sokolski, Dr inż. Marek Sokolski

Institut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
Ul. Wybrzeże Wyspiańskiego nr 27, 50-370 Wrocław, Polska
E-mail: piotr.sokolski@pwr.wroc.pl, marek.sokolski@pwr.wroc.pl

Ocena odporności na uszkodzenia katastroficzne wielkogabarytowych ogniw gąsienicowych podwozi maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego

Słowa kluczowe: wielkogabarytowe podwozia gąsienicowe, degradacja, uszkodzenia ogniw gąsienicowych, numeryczne analizy wytrzymałościowe

Streszczenie. Wielkogabarytowe podwozia gąsienicowe maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego pracują w wyjątkowo trudnych warunkach eksploatacyjnych: są poddawane ekstremalnie dużym obciążeniom roboczym oraz agresywnemu oddziaływaniu środowiska. W takich warunkach procesy degradacji mogą rozwijać się szczególnie intensywnie, a ich efektem są zużycie lub uszkodzenia elementów i zespołów tych podwozi. Szczególnie groźne są uszkodzenia katastroficzne elementów łańcucha gąsienicy: ogniw lub sworzni łączących (odkształcenia plastyczne lub kruche pęknięcia), które wykluczają na ogół dalszą eksploatację podwozia. Mając to na uwadze, przeprowadzono studium struktury uszkodzeń elementów wielkogabarytowych podwozi gąsienicowych. Na podstawie modeli numerycznych dokonano oceny wyężenia typowych wielkogabarytowych ogniw gąsienicowych, wyznaczono obszary krytyczne i zaproponowano modyfikacje ich cech geometrycznych. Wynikiem tych modyfikacji jest znaczące zwiększenie odporności ogniw na uszkodzenia katastroficzne, co jest szczególnie istotne w aspekcie bezpieczeństwa eksploatacji maszyn podstawowych.

1. Wprowadzenie

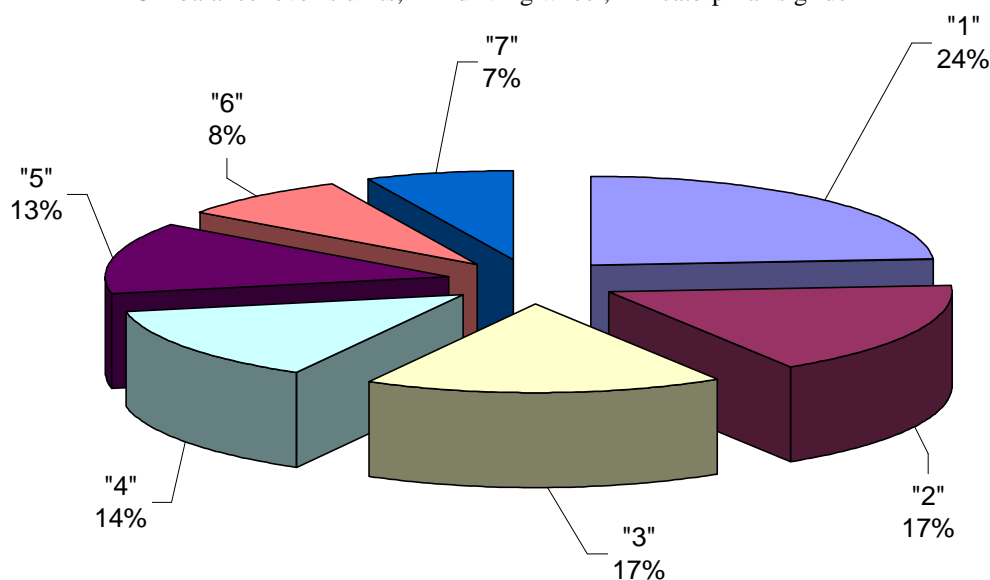
Wielkogabarytowe podwozia gąsienicowe maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego (rys. 1) są poddawane wyjątkowo dużym obciążeniom roboczym i są eksploatowane w trudnych warunkach środowiskowych (niska temperatura, opady, zapylenie, błoto). W takich okolicznościach elementy i zespoły tych podwozi są szczególnie narażone na degradację i uszkodzenia.

Decydujący wpływ na skalę i intensywność procesów degradacji elementów podwozi gąsienicowych mają wartości i charakter działania obciążeń roboczych. W tym aspekcie szczególnie niebezpieczne są ekstremalnie duże obciążenia, nieprzewidziane przez projektanta. Ich efektem mogą być uszkodzenia nagłe/katastrofalne, związane ze zniszczeniem elementów – np. znaczną deformacją plastyczną lub kruchym pęknięciem.

Z danych statystycznych wynika, że uszkodzenia łańcuchów gąsienicowych stanowią około 15% wszystkich przypadków uszkodzeń zespołów jazdy koparek wielonaczyniowych (rys. 2) [12]. Blisko 70% tych uszkodzeń powstaje z przyczyn eksploatacyjnych: skutek dużych obciążeń dynamicznych (zwłaszcza podczas rozruchu i skrętu), trudnych warunków tribologicznych w obszarze łańcucha gąsienicy (ograniczone możliwości zapewnienia odpowiedniego smarowania, co powoduje szybsze zużywanie ściernych elementów) oraz agresywnego oddziaływania środowiska gruntowego (korozja i starzenie materiałów). Niespełna 10% ogółu uszkodzeń elementów podwozi gąsienicowych maszyn podstawowych jest wywoływane przyczynami technologicznymi – w szczególności imperfekcjami materiałowymi lub nieodpowiednią obróbką cieplno – chemiczną.



Rys. 1. Podstawowe podzespoły wielkogabarytowego podwozia gąsienicowego: A – łańcuch gąsienicowy, B - koła wsporcze, C – układy wahaczowe, D – wielobok napędowy, E – dźwigar gąsienicy
 Fig. 1. Basic subassemblies of a large-size tracked undercarriage: A – caterpillar chain, B – supporting wheels, C – balance lever's units, D – driving wheel, E – caterpillar's girder



Rys. 2. Struktura uszkodzeń gąsienicowych zespołów jazdy maszyn podstawowych w polskich kopalniach węgla brunatnego: 1 – zespół koła wsporcze górnego, 2 – zespół wahaczy i wózka, 3 – konstrukcja nośna dźwigara, 4 – łańcuch gąsienicy, 5 – zespół koła napędowego, 6 – zespół koła zwrotnego, 7 – napęd gąsienicy [12]
 Fig. 2. The structure of failures of caterpillar undercarriages of basic machines in Polish open-pit mines: 1 – unit of upper supporting wheel, 2 – unit of balance lever and carriage, 3 – girder's supporting structure, 4 – caterpillar chain, 5 – unit of driving wheel, 6 – unit of turning wheel, 7 – drive of the caterpillar [12]

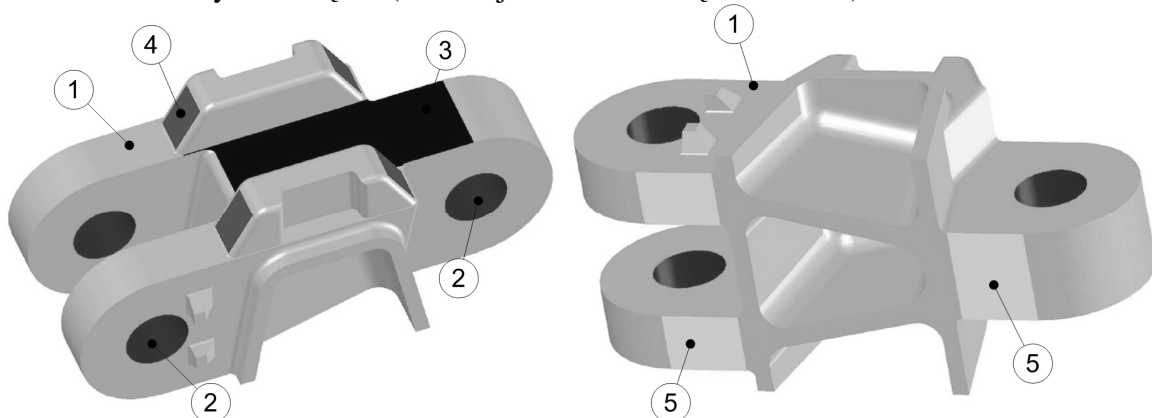
2. Podstawowe formy degradacji ogniów gąsienicowych

Konsekwencją degradacji wielkogabarytowych podwozi gąsienicowych są częściowe lub całkowite uszkodzenia ich elementów, przy czym około 80% wszystkich przypadków stanowią tzw. uszkodzenia częściowe, przy których możliwa jest dalsza eksploatacja maszyny chociaż w ograniczonym zakresie (np. przy zmniejszonych prędkościach i oporach ruchu).

W kontekście możliwych konsekwencji uszkodzeń szczególne znaczenie ma łańcuch gąsienicy, a zwłaszcza jego ogniwa i sworznie łączące. Prawie każde uszkodzenie jednego z ogniów lub sworzni łączących wyklucza bowiem dalszą eksploatację maszyny.

Z badań wynika, że degradacja ogniw gaśnicowych zachodzi przede wszystkim w następujących obszarach (rys. 3) [12]:

- W strefie uch ogniw (strefa „1”, rys. 3). Degradacja tych obszarów jest efektem działania ekstremalnie dużych obciążeń roboczych, nieprzewidzianych w ramach normalnej eksploatacji. Przypadki takie mogą występować na przykład przy jeździe po krzywiźnie o zbyt małym promieniu, a zwłaszcza podczas próby skrętu w miejscu. Efektem degradacji są tu deformacje plastyczne lub pęknięcia uch i każdy z tych przypadków stanowi praktycznie uszkodzenie nienaprawialne, zaliczane do tzw. uszkodzeń katastroficznych.
- Na powierzchni otworów podsworzniowych w uchach ogniw (strefa „2”, rys. 3). Degradacja ma tu charakter zużycia ściernego wskutek tarcia między sworzniami i tulejami w warunkach zanieczyszczeń i korozji.
- Na powierzchni bieżni ogniw (strefa „3”, rys. 3). Degradacja ma charakter rozwalcowywania bieżni przez koła jezdne zespołu gaśnicy. Dodatkowo mogą występować obciążenia udarowe podczas najeżdżania kół jezdnych na bieżnie kolejnych ogniw.
- Na przednich i tylnych powierzchniach zabierakowych (strefa „4”, rys. 3). Degradacja tych obszarów jest wynikiem oddziaływania zębów układu napędowego gaśnicy. Ze względu na konieczność przejazdów maszyny do przodu i do tyłu, procesy degradacji występują zarówno w przedniej jak i tylnej strefie tej części ogniw.
- U podstawy uch ogniw (strefa „5”, rys. 3). Degradacja w tym obszarze jest wywoływana tarcieniem o podłoże gruntowe podczas skrętu pod działaniem znacznych obciążeń (naciski jednostkowe rzędu 100 kPa).



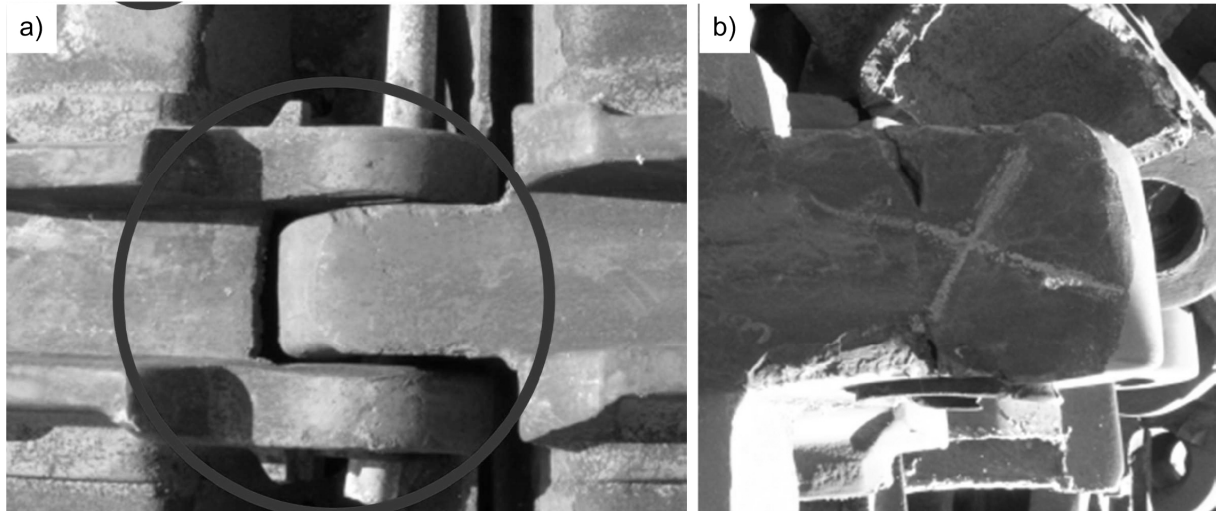
Rys. 3. Podstawowe obszary degradacji ogniw wielkogabarytowych podwozi gaśnicowych [12]
(opis w tekście)

Fig. 3. Areas of basic degradation of large-size chain links [12] (detailed description in the text)

Degradacja sworzni łączących ogniwa jest stosunkowo łatwa do usunięcia poprzez wymianę sworznia na nowy lub zregenerowany. Nieco bardziej kłopotliwe jest usunięcie skutków degradacji w otworach podsworzniowych; w takich przypadkach naprawa polega na wymianie tulei. Degradacja uch ogniw gaśnicowych: deformacje plastyczne lub kruche pęknięcia (rys. 4), występujące pod wpływem przeciążenia, ma zazwyczaj charakter uszkodzeń nienaprawialnych i kwalifikuje całe ogniwo do wymiany. Nierzadko konieczna jest także wymiana obu współpracujących ogniw. Pociąga to za sobą znaczne koszty wynikające nie tylko z kosztów samych ogniw, ale także ze strat generowanych wyłączeniem maszyny z eksploatacji.

Niewielkie odkształcenia plastyczne uch ogniwi nie zawsze oznaczają konieczność natychmiastowej wymiany ogniwa, ale ich dalsza eksploatacja może spowodować uszkodzenia innych elementów zespołu jazdy.

Typowym przykładem negatywnych konsekwencji dalszego użytkowania ogniwi i sworzni łączących, w których wystąpiły deformacje plastyczne, jest zjawisko tzw. ukosowania płyt gąsienicowych, które powoduje nierównomierną dystrybucję obciążeń na podłoże gruntowe. W skrajnych przypadkach może to prowadzić do uszkodzenia płyt gąsienicowych wskutek ich wzajemnego nachodzenia na siebie.



Rys. 4. Przykłady uszkodzeń uch ogniwi gąsienicowych: a) deformacje plastyczne, b) pęknięcie kruche [archiwum własne]

Fig.4. Examples of failures of links' lugs: a) plastic deformation, b) brittle fracture [authors' archive]

Degradacja otworu podsworzniowego wykonanego bezpośrednio w uchu ogniwa (np. owalizacja lub wykruszenie powierzchni) stanowi uszkodzenie nienaprawialne, co kwalifikuje całe ogniwo do wymiany. Jednym ze sposobów umożliwiających naprawę uszkodzeń otworów podsworzniowych jest stosowanie tulei, które po osiągnięciu granicznego zużycia wymieniane są na nowe – bez konieczności wymiany całego ogniwa.

Głównymi przyczynami stopniowej degradacji otworów podsworzniowych ogniwi gąsienicowych są niekorzystne warunki tribologiczne (duże obciążenia jednostkowe utrudniają uzyskanie właściwego smarowania a zanieczyszczenia zawierające twarde wtrącenia działają jak ścierniwo) oraz korozja (woda i błoto powodujące niszczenie powierzchni otworów i sworzni pod wpływem agresywnego działania czynników chemicznych).

3. Krótki przegląd dorobku z zakresu zagadnień eksploatacyjnych ogniwi gąsienicowych

Dorobek naukowy związany z tematyką eksploatacji wielkogabarytowych podwozi gąsienicowych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego jest bogaty.

Obszerne studium poświęcone ogólnym problemom degradacji długotrwale eksploatowanych wielonaczyniowych koparek i zwałowarek zamieszczono w pracach [5,7]. Wyjątkową pozycją w literaturze przedmiotu, opisującą szczegółowo skutki degradacji maszyn podstawowych w polskich kopalniach węgla brunatnego, jest praca [1].

Publikacje odnoszące się do zagadnień szczegółowych z zakresu degradacji elementów podwozi gąsienicowych koncentrują się na następujących głównych grupach tematycznych:

- identyfikacja obciążeń roboczych,
- zagadnienia wytrzymałościowe,

- analiza procesów degradacji,
- zagadnienia konstrukcyjne,
- zagadnienia eksploatacyjne.

Problematykę wyznaczania obciążeń roboczych elementów wielkogabarytowych podwozi gąsienicowych analizowano między innymi w pracach [9,10], w których przedstawiono empiryczną metodę oceny wartości sił trakcyjnych w procesie eksploatacji maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego.

Przypadek uszkodzenia wału napędowego zespołu jazdy wielonaczyniowej koparki kołowej jest tematem pracy [8]. Na podstawie analiz numerycznych oraz wyników pomiarów wykazano, że główną przyczyną tego uszkodzenia był niewłaściwy kształt czopa wału, co doprowadziło do powstawania karbu konstrukcyjnego w tym obszarze. Efektem tego było ukręcenie wału w wyniku powstawania lokalnych odkształceń plastycznych i przekroczenia granicy wytrzymałości zmęczeniowej [8].

Problematyka oceny wytrzymałości elementów podwozi gąsienicowych jest przedmiotem między innymi prac [3,11,13]. Przypadek degradacji ogniw gąsienicowych zwałowarki analizowano szczegółowo w pracy [3] i wykazano, że główną przyczyną uszkodzeń były wady materiałowe: mikropęknięcia oraz wytrącenia węglików. W pracy [2] analizowano uszkodzenia elementów podwozia wielonaczyniowej koparki kołowej: wahaczy, ogniw oraz płyt gąsienicowych. Na podstawie symulacji numerycznych wykazano, że przyczynami uszkodzeń była zbyt mała wytrzymałość tych elementów na obciążenia boczne.

Zagadnienia konstrukcyjne związane z racjonalnym kształtowaniem elementów łańcuchów gąsienic: ogniw, sworzni łączących i płyt gąsienicowych są przedmiotem zainteresowań zwłaszcza ośrodków projektowych. W tym zakresie szczególnym osiągnięciem jest oryginalne rozwiązanie węzła ciernego „tuleja – sworzeń” łączącego ogniwa gąsienicowe, opracowane przez Biuro Projektowo – Techniczne SKW [14]. Węzeł ten jest zabezpieczony przed dostawaniem się zanieczyszczeń skalno – gruntowych.

Publikacje z zakresu zagadnień eksploatacyjnych wielkogabarytowych podwozi gąsienicowych obejmują między innymi tematykę materiałów smarnych i nowych technik smarowania, które mogłyby zostać wykorzystane w węzłach łączących ogniwa gąsienicowe. Stosowanie konwencjonalnych lubrykatów w węzłach mocno obciążonych nie zawsze bowiem umożliwia uzyskanie korzystniejszych charakterystyk tribologicznych.

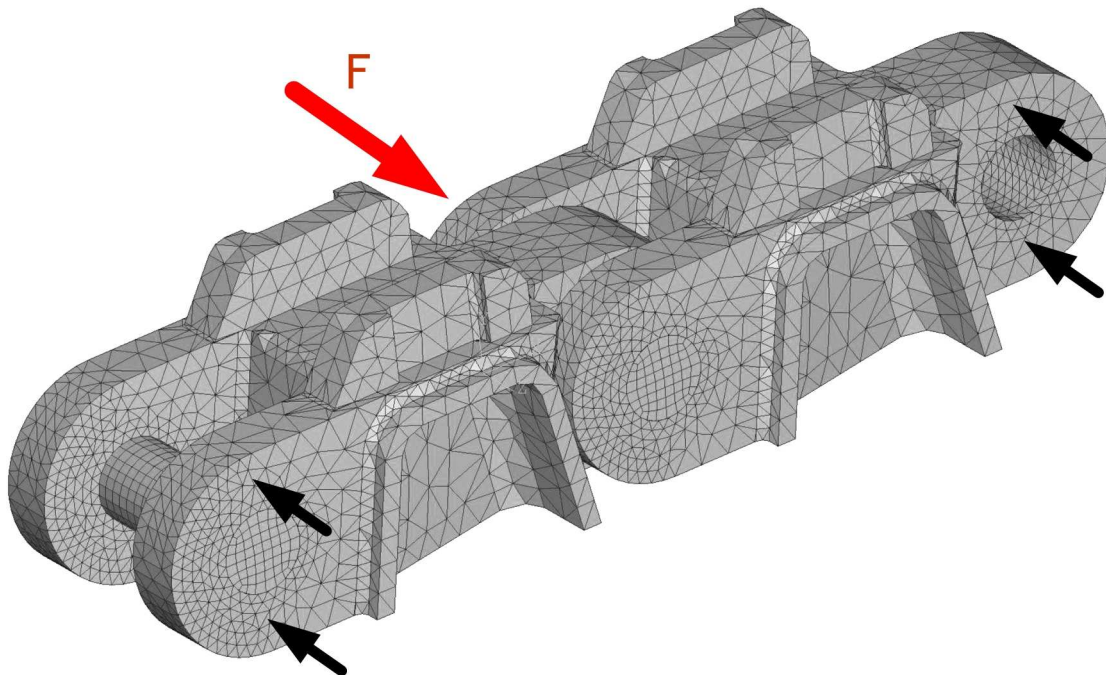
Oryginalne rozwiązania z tego obszaru opracowano w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii IKEM Politechnik Wrocławskiej. Jedno z tych rozwiązań polega na zastosowaniu smaru litowego z domieszką proszku PTFE, co znacząco zwiększa skuteczność smarowania przy jednoczesnym obniżeniu zużycia elementów pary cierniej [6]. Inną propozycją jest zastosowanie smaru z dodatkiem grafitu i MoS₂ w postaci proszków, co znacząco obniża wartość naprężeń ścinających smar, a tym samym powoduje zmniejszenie oporów ruchu w węzle smarowanym [4]. Oba te rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie w łańcuchach gąsienicowych podwozi wielkogabarytowych maszyn górniczych.

4. Analiza wytrzymałościowa – obciążenia graniczne ogniw gąsienicowych

Otwór podsworzniowy stanowi niejako „naturalne” osłabienie przekroju ucha gąsienicowego. Z tego względu jest to jeden z najbardziej podatnych na uszkodzenia obszarów w strukturze ogniwa – zwłaszcza w warunkach wystąpienia znacznych sił bocznych. W ekstremalnych warunkach, niezależnie od uszkodzenia ogniw, może między innymi dojść do awarii dyszla sterującego procesem skrętu maszyn. Jeden z takich przypadków opisano szczegółowo w pracy [1].

Mając na uwadze możliwe konsekwencje uszkodzeń uch, opracowano modele numeryczne podstawowych ogniw stosowanych w wielkogabarytowych podwoziach

wielonaczyniowych koparek i zwałowarek. Jeden z takich modeli, dla ogniw typu „I”, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Model dyskretny zespołu „ogniwo – sworzeń – ogniwo” [12]
Fig. 5. Discrete model of “link – pin – link” connection [12]

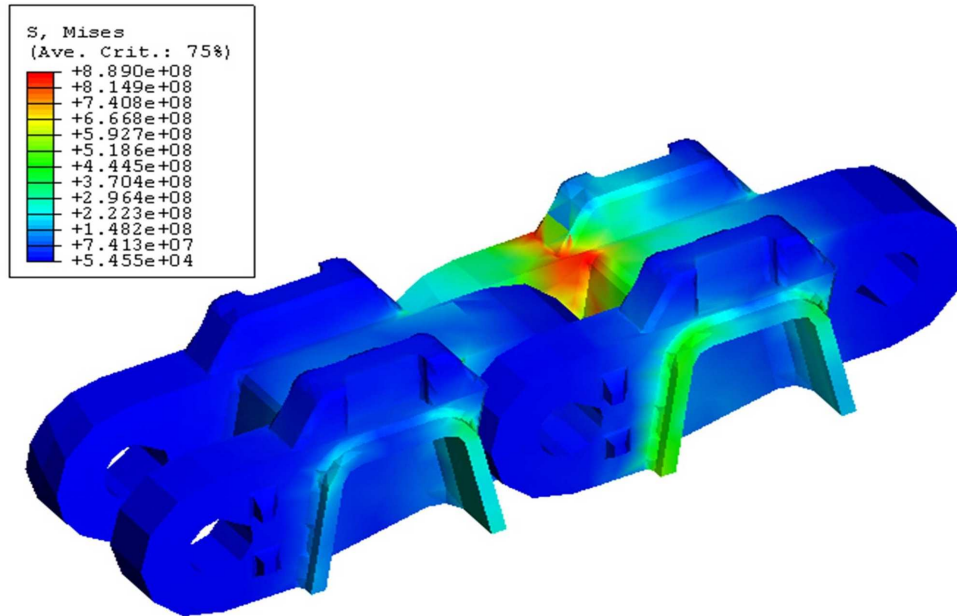
Analizy wytrzymałościowe przeprowadzono metodą elementów skończonych dla obciążeń bocznych z przedziału $F = 10 \div 10000$ kN, przyjmując kilka charakterystycznych warunków brzegowych (podparcia zespołu ogniw). W obliczeniach uwzględniono właściwości wytrzymałościowe i plastyczne staliwa L35GSM (m. in. granicę plastyczności $R_e = 850$ MPa) jako materiału, z którego są wykonywane ogniwa. Jako podstawowe cele symulacji numerycznych przyjęto:

- wyznaczenie obszarów krytycznych w strukturze ogniw, w których występuje koncentracja naprężeń i które są szczególnie narażone na powstawanie uszkodzeń,
- oszacowanie wartości obciążeń granicznych, wywołujących zniszczenie ogniw, tj. deformacje plastyczne lub kruche pęknięcia.

Na podstawie obliczeń stwierdzono, że jednym z najbardziej niebezpiecznych obszarów w zespole „ogniwo – sworzeń – ogniwo” jest strefa podstawy ucha cienkiego. Wykazano ponadto, że graniczna wartość boczno obciążenia uplastyczniającego dla ogniwa typu „I” wynosi około $F_{max} \approx 3000$ kN. Przykładowe wyniki analiz wytrzymałościowych dla takiej wartości obciążenia przedstawiono na rys. 6.

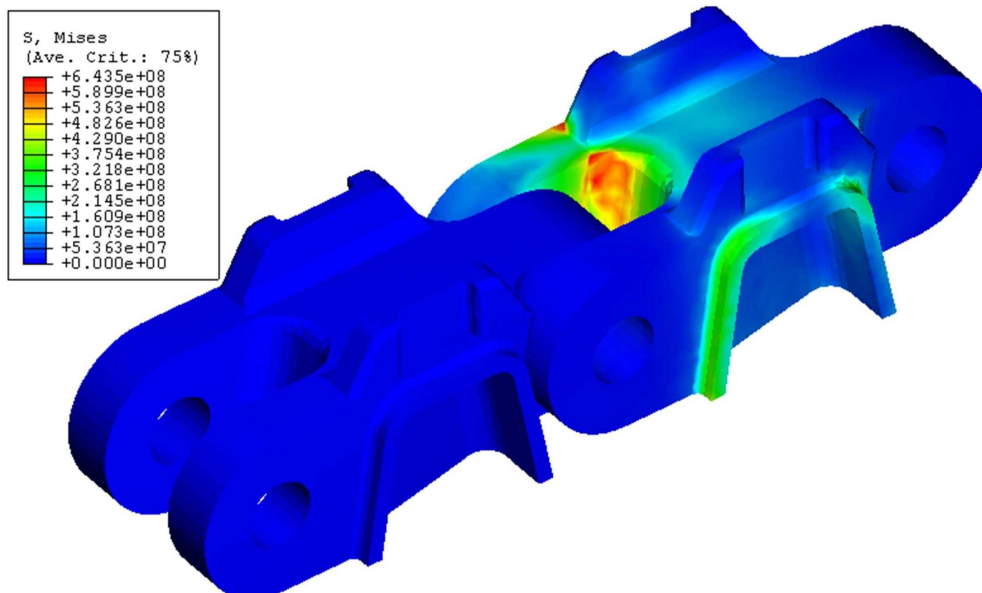
Wyniki tych obliczeń zostały zweryfikowane w badaniach stanowiskowych Zakładu Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki IKEM Politechniki Wrocławskiej przeprowadzonych u producenta tych ogniw.

Na podstawie normy PN-G-47000-2:2005: „Górnictwo odkrywkowe. Koparki wielonaczyniowe i zwałowarki. Część 2: Podstawy obliczeniowe” przyjęto, że wymagany współczynnik bezpieczeństwa ogniw, odniesiony do granicy plastyczności, wynosi $X = 1,3$. Oznacza to, że maksymalne wartości naprężenia zredukowanego w ogniwie, określone według hipotezy Hubera – Misesa, nie powinny przekraczać wartości 650 MPa.



Rys. 6. Przykładowe warstwy naprężeń zredukowanych w zespole „ogniwo – sworzeń – ogniwo” pod wpływem działania bocznego obciążenia uplastyczniającego
 Fig. 6. Exemplary distribution of von Mises stress in the “link – pin – link” connection under the influence of plasticizing lateral loading

Mając to na uwadze, opracowano koncepcje modyfikacji geometrii ogniwo w obszarach krytycznych, w których występowało uplastycznienie materiału. W szczególności wprowadzono zmiany w strefach podstawy ucha cienkich i ucha grubego oraz w strefie podstawy powierzchni współpracujących z kołem napędowym gąsienicy. Modyfikacje te opisano szczegółowo w pracy [12]. Wyniki symulacji wyteżenia ogniwo o zmodyfikowanej geometrii przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Przykładowe warstwy naprężeń zredukowanych w zespole „ogniwo – sworzeń – ogniwo” po zastosowaniu modyfikacji przekrojów krytycznych
 Fig. 7. Exemplary distribution of von Mises stress in the “link – pin – link” connection under the influence of plasticizing lateral loading after applying modifications of the critical areas

Daje się zauważyć, że po wprowadzeniu zmian w geometrii przekrojów krytycznych, zgodnie z propozycjami jednego z autorów [11, 12], uzyskuje się znaczące obniżenie maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych do wymaganego poziomu 650 MPa.

Oznacza to jednocześnie, że zmodernizowane ogniwa gaśnicowe są w stanie przenosić obciążenia graniczne większe o około 30% w porównaniu do ogniw dotychczas stosowanych. Może to przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji podwozi gaśnicowych maszyn podstawowych.

4. Podsumowanie

Ogniwa gaśnicowe należą do kluczowych elementów zespołów jazdy wielkogabarytowych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Degradacja ogniw zachodzi w tych maszynach w większości przypadków z przyczyn eksploatacyjnych, tj. wskutek dużych obciążeń roboczych oraz niekorzystnych warunków środowiskowych (zapylenie, błoto, niska temperatura).

W tym kontekście istotne znaczenie ma poznanie mechanizmów degradacji tych elementów, a także identyfikacja tzw. obszarów krytycznych, szczególnie narażonych na uszkodzenia oraz wyznaczenie obciążeń granicznych powodujących zniszczenie ogniw: deformacje plastyczne lub pęknięcia kruche.

Mając to na uwadze, na podstawie analizy danych statystycznych zakładów remontowych polskich kopalń węgla brunatnego oraz badań własnych autorów określono strukturę procentową typowych form degradacji wielkogabarytowych ogniw gaśnicowych. Uwzględniono przypadki stopniowej degradacji (zużycie, korozja) oraz przypadki degradacji nagłej/katastroficznej (deformacje plastyczne, wykruszenia, pęknięcia).

W celu analizy wytrzymałościowej zbudowano modele geometryczne typowych rodzajów ogniw gaśnicowych stosowanych w podwoziach maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Przeprowadzono symulacje numeryczne wyteżenia ogniw dla różnych wariantów bocznych obciążeń zewnętrznych. Na tej podstawie wyznaczono obszary krytyczne w strukturze analizowanych ogniw, szczególnie narażone na uszkodzenia oraz obliczono wartości graniczne obciążeń powodujących zniszczenie ogniw.

W celu zwiększenia odporności ogniw gaśnicowych na uszkodzenia opracowano koncepcje zmian geometrii w obszarach krytycznych. Efektami tych zmian są: zwiększenie o około 30% wartości obciążenia granicznego niszczącego ogniwa oraz obniżenie wyteżenia ogniw przy dotychczasowym poziomie granicznych obciążeń roboczych.

Wdrożenie tych modyfikacji może przyczynić się do zwiększenia niezawodności wielkogabarytowych podwozi gaśnicowych, bowiem eksploatawanie nawet częściowo zdegradowanych ogniw gaśnicowych może inicjować proces destrukcji innych elementów podwozia – jako swoisty „efekt domina”. Zmianym przykładem tego jest uszkodzanie płyt gaśnicowych wskutek ich klawiszowania.

Informacja o finansowaniu

Praca była współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (projekt badawczy MK/SN/280/V/2011/U).

Literatura

1. Babiarz S, Dudek D. Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2007.

2. Bosnjak S, Petkovic Z, Zrnic N, Pantelic M, Obradovic A. Failure analysis and redesign of the bucket wheel excavator two-wheel bogie. *Engineering Failure Analysis* 2010, 17: 473–485.
3. Bosnjak S M, Arsic M A, Zrnic N D, Odanovic Z D, Djordevic M D. Failure Analysis of the Stacker Crawler Chain Link. *Procedia Engineering* 2010, 10: 2244–2249.
4. Czarny R, Paszkowski M. The influence of graphite solid additives, MoS₂ and PTFE on changes in shear stress values in lubricating greases, *Journal of Synthetic Lubrication* 2007, 24 (1): 19–29.
5. Dudek D, Nowakowski T. Problems of degradation and maintenance of surface mine engineering machines. *Proceedings of International Symposium on Materials Ageing and Component Life Extension*, Milan, Italy, 10–13 October 1995. Vol. 2. Eds. V. Bicego, A. Nitta, R. Viswanathan Warley: Engineering Materials Advisory Services, 1995: 1285–1294.
6. Krawiec S. The synergistic effect of copper powder with PTFE in a grease lubricant under mixed friction conditions, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011, 11 (2): 379–390.
7. Nowakowski T. Comparative analysis of degradation degree of bucket wheel excavators. *Proceedings of ESREL '99 - The Tenth European Conference on Safety and Reliability*, Munich-Garching, Germany, 13–17 September 1999. Vol. 1/ Ed. by G. I. Schueller, P. Kafka Rotterdam : A.A.Balkema, 1999: 223–227.
8. Rusiński E, Harnatkiewicz P, Bobyr M, Yakhno B. Caterpillar drive shaft damage causes analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008, 8 (3):117–129.
9. Smolnicki T, Maślak P. Measurement of traction and steering forces of multicaterpillar mechanism of stacker machine drive. *27th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, September 22nd–25th, Wrocław 2010, Wrocław University of Technology: 195–196.
10. Smolnicki T, Maślak P. Multicaterpillar track chassis of big machines – identification of loads. *Key Engineering Materials* 2012, 490: 187–194.
11. Sokolski P. Analiza wpływu cech geometrycznych na wyężenie obszarów krytycznych ogniów gęsienicowych wielkogabarytowych maszyn górnictwa. *Górnictwo Odkrywkowe* 2011, 52 (3/4): 38–41.
12. Sokolski P. Metoda diagnozowania ogniów gęsienic wielkogabarytowych maszyn roboczych. (rozprawa doktorska). Wrocław: Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Seria PRE Nr 9/2012.
13. Sokolski P. Poprawa efektywności działania wielkogabarytowych podwozi gęsienicowych poprzez modyfikacje postaci geometrycznej ich elementów. Monografia: Efektywność wykorzystania maszyn roboczych i urządzeń w przemyśle: eksploatacja – niezawodność – bezpieczeństwo. Red. nauk. Adam Idzikowski. Częstochowa: Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej 2013: 108–116.
14. Wocka N, Warcholak A. Działania innowacyjne zwiększające trwałość i niezawodność eksploatacyjną gęsienicowych mechanizmów jazdy koparek i zwalowarek w polskich kopalniach węgla brunatnego. *Górnictwo i Geoinżynieria* 2011,35 (3/1): 291–307.