

Dr inż. Dominika Grygier

Politechnika Wrocławska, Katedra Materiałoznawstwa Wytrzymałości i Spawalnictwa,
ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław
e-mail: dominika.grygier@pwr.wroc.pl

Wpływ eksploatacji gąsienic elastomerowych na wybrane własności drutów stalowego kordu

Słowa kluczowe: gąsienica elastomerowa, kord, stal perlityczna

Streszczenie: Gąsienicowe układy bieżne umożliwiają poruszanie się ciężkich pojazdów po powierzchniach nieutwardzonych oraz w trudnym terenie, zaśnieżonym, bagnistym lub grząskim, a także pokonywanie przeszkód naturalnych i sztucznych. Ważnym elementem konstrukcyjnym gąsienic elastomerowych jest stalowy kord, zatopiony w elastomerze tworzącym rzeźbę bieżnika, ma on na celu usztywnienie konstrukcji, zachowanie jej właściwego ugięcia oraz nadanie odpowiedniej odporności na siły rozciągające. Wyniki badań prezentowanych w pracy wykazały, że eksploatacja gąsienic elastomerowych w warunkach, w których narażone są na ciągłą styczność z podłożem, częste hamowanie oraz uderzenia w nierówności prowadzi do uszkodzania materiału stalowego kordu i zmiany jego własności mechanicznych.

1. Wprowadzenie

Gąsienicowe układy bieżne umożliwiają poruszanie się ciężkich pojazdów po powierzchniach nieutwardzonych oraz w trudnym terenie, zaśnieżonym, bagnistym lub grząskim, a także pokonywanie przeszkód naturalnych i sztucznych [5, 7, 28]. Jest to możliwe przez rozłożenie masy pojazdu na większej powierzchni, co powoduje znaczny spadek nacisków jednostkowych, wzrost przyczepności pojazdu i uzyskanie większej siły napędowej. Układy te służą również poprawie jakości prowadzenia i manewrowania pojazdem w trudnych warunkach terenowych przez zmniejszenie oporów toczenia i skłonności pojazdu do grzęźnięcia.

Gąsienica jest zamkniętą taśmą opasającą koła i rolki będące elementami gąsienicowego układu bieżnego, na której obwodzie można wyróżnić cztery strefy: górną, przetaczaną przez rolki napinające, oporową, współpracującą z gruntem, od niej zależy wielkość uzyskanej siły napędowej niezbędnej do realizacji ruchu pojazdu oraz dwie części pochyłe zawarte między jednym z kół nośnych, a kołem napędowym oraz kołem nośnym i kołem kierunkowym [5, 28]. Gąsienica przenosi wszystkie siły, pionowe, wzdłużne i poprzeczne, występujące podczas kontaktu pojazdu z podłożem. Ze względu na budowę wyróżnia się gąsienice metalowe, gumowo-metalowe oraz elastomerowe.

Gąsienice elastomerowe konstruowane są na zasadzie łańcucha wewnętrznego, tworzonego przez ogniwa odpowiedzialne za przeniesienie napędu z koła napędzającego oraz zapobiegające ześlizgnięciu się gąsienicy [5, 7, 28]. Gąsienica dodatkowo wzmocniana jest stalowym kordem, zatopionym w elastomerze tworzącym rzeźbę bieżnika, mającym na celu usztywnienie konstrukcji, zachowanie jej właściwego ugięcia oraz nadanie odpowiedniej odporności na siły rozciągające.

Kord jest konstrukcją złożoną ze splotek utworzonych poprzez kilka splecionych ze sobą pojedynczych drutów. Kord może stanowić również sama splotka wykonana z kilku drutów [3, 11, 16, 19, 20]. Pojedyncze druty posiadają średnicę od 0,15 do 0,38 mm, produkowane są jako drut mosiądzowany lub pokrywane cynkiem i posiadają następujące własności [16, 18, 19, 20]:

- bardzo wysoki moduł dynamiczny,
- duża sztywność,
- wysoka wytrzymałość,
- mała zdolność pełzania,
- wysoki moduł ściskania,

- stabilność wymiarowa,
- wysokie częstotliwość rezonansu.

Druty przeznaczone do produkcji stalowego kordu wzmacniającego gaśienice wykonywane są z niestopowej stali perlitycznej. Stale perlityczne zawierające od około 0,70 do 0,95% C należą do grupy stali niestopowych klasy jakościowej przeznaczonej do ciągnięcia lub walcowania na zimno [1-3, 8, 11, 18, 20]. Ich skład chemiczny oraz własności mechaniczne są zgodne z normą PN-EN 10323:2006 (U) [11]. Druty stalowe na kord standardowo charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie w granicach od 2573 do nawet 4116 MPa [11, 16].

Jednym z problemów szeroko opisywanych w literaturze jest pękanie stali perlitycznej, poddawanej obróbce plastycznej oraz będącej w trakcie eksploatacji [4, 18, 10, 14, 16]. Problem ten jest tym poważniejszy, że dotyczy wielu gałęzi przemysłu, w których stosowany jest stalowy kord, z tego też względu jest on tematem wieloletnich badań prowadzonych w licznych ośrodkach naukowych na całym świecie [14, 25, 26, 31].

Wytrzymałość zmęczeniowa stalowych drutów jest w dużym stopniu uzależniona od czystości metalurgicznej materiału, a szczególnie od zawartości tlenu, krzemu i siarki. Obecność wtrąceń niemetalicznych w stali silnie obniża wytrzymałość zmęczeniową, gdyż to wokół zanieczyszczeń następują silne spiętrzenia naprężeń, prowadzące w efekcie do pęknięcia elementów [1, 4, 11, 16, 20].

Według Golisa [16] maksymalna dopuszczalna zawartość wtrąceń niemetalicznych w niestopowej stali perlitycznej, gatunków D75, D78, D80 i D83 przeznaczonej do produkcji drutów kordowych nie powinna przekraczać wielkości wzorca nr 2 według normy EN 10247:2007. Wtrącenia niemetaliczne, w tym szczególnie te o minimalnej plastyczności jak tlenki lub krzemiany kruche, powodują obniżenie ciągliwości drutu utrudniając procesy technologiczne. Obecność wtrąceń stanowi główną przyczynę obniżania stopnia odkształcenia materiału.

Badania przeprowadzone przez Zelina [30] wykazały, że na skutek odkształceń sprężystych poprzedzających trwałe odkształcenie plastyczne materiału, następuje poziome mikrorozwarstwienia pojedynczych płytek cementytu. Zmiany te obserwowane były zarówno podczas rozciągania jak i skręcania drutów. W trakcie wzrostu przyłożonej siły następuje koalescencja powstałych mikrorozwarstwień i propagacja pęknięcia, skutkująca dekohezją całego elementu.

Sauvage i Ivanisenko [21, 22, 29] wykazali, że przyczyną pęknięcia stali perlitycznej poddawanej obróbce plastycznej jest segregacja wydzieleni węglkowych na granicach międzyfazowych. Badania te potwierdziły teorię opisywaną wcześniej przez Gridneva i Gavriluka [15, 17, 20], według których na skutek odkształcenia plastycznego atomy węgla zajmują wakanse powstające w sieci krystalicznej cementytu, powodując tym samym zwiększenie koncentracji atomów węgla na granicy międzyfazowej ferryt, cementyt i w konsekwencji skutkując kruchością tych struktur. Oba zespoły wykazały prosty związek pomiędzy stopniem odkształcenia plastycznego, a skłonnością stali perlitycznej do pęknięcia. Wzrostowi odkształcenia towarzyszy wzrost gęstości defektów sieciowych i tym samym zwiększa się intensywność segregacji wydzieleni węglkowych na granicach faz.

Analiza strukturalna przeprowadzona przez Izotova i zespół [23, 24] wykazała jednoznacznie, że pękanie płytek cementytu następuje w wyniku spiętrzenia dyslokacji na granicy faz pomiędzy wydzieleniem ferrytu i cementytu. Na skutek przyłożonej siły następuje ruch dyslokacji krawędziowych w wydzieleniach ferrytu i przemieszczanie się fragmentów kryształu po płaszczyznach poślizgu, a ze względu na fakt, iż każda płytka ferrytu posiada odmienną orientację krystalograficzną dyslokacje krzyżują się na płytkach cementytu inicjując ostatecznie powstanie mikropęknięć. Badania te potwierdziły wcześniejsze doniesienia literaturowe, prace Langforda, Wilsona, Embury i Fishera [12, 13, 31] wskazujące, iż w trakcie odkształcenia plastycznego stali perlitycznej to właśnie na płytkach cementytu następuje najsilniejsza koncentracja defektów sieci krystalicznej, co w konsekwencji jest przyczyną pęknięcia tych składników strukturalnych.

Odmienną teorię wyjaśniającą mechanizm pęknięcia płytek cementytu przedstawił Languillaume z zespołem [27]. Według tych badań w wyniku odkształcenia plastycznego perlitu następuje niekontrolowany, bardzo silny wzrost energii na styku obu faz, czyli w przestrzeniach

międzyplytkowych perlitu. Ten obserwowany wzrost energii prowadzi do termodynamicznej destabilizacji cementytu skutkującej pękaniem jego płytek. Wyniki tych badań zostały wielokrotnie potwierdzone przez inne zespoły badawcze w tym między innymi przez Danoix i Sauvage [9, 29, 31].

2. Cel i przedmiot badań

Gąsienice elastomerowe minikoparek narażone są podczas eksploatacji na ciągłą styczność z podłożem, częste hamowanie oraz liczne uderzenia w nierówności. Takie warunki pracy mogą prowadzić do uszkodzania materiału stalowego kordu, stanowiącego usztywnienie konstrukcji gąsienicy, a w konsekwencji do zmiany jej własności użytkowych. Wyniki ankietyzacji przeprowadzonej wśród dolnośląskich firm ogólnobudowlanych, wykazały, że średnia żywotność gąsienic elastomerowych stosowanych w minikoparkach to około 825 motogodzin, a najczęstszą przyczyną ich uszkodzeń jest rozerwanie stalowego kordu skutkujące przerwaniem ciągłości bieźnika (rys. 1).

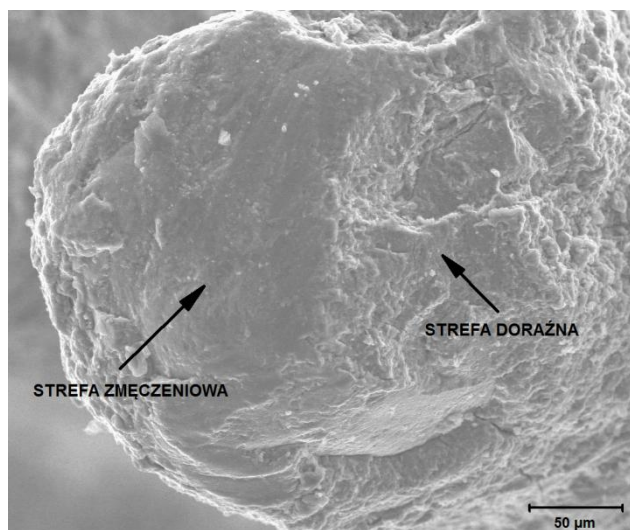
Badania fraktograficzne drutów uszkodzonego stalowego kordu, wykonane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego, wykazały obecność powierzchni wskazujących na zmęczeniowy charakter uszkodzenia (rys.2). Część zmęczeniowa przełomu była gładka, z charakterystycznymi prążkami zmęczeniowymi układającymi się prawie równolegle do kierunku rozwoju pęknięcia. Ognisko przełomu zlokalizowane było na krawędzi zewnętrznej drutu, czyli w obszarze największego spiętrzenia złożonych naprężeń eksploatacyjnych. Na obwodzie zewnętrznym przełomów drutów widoczna była strefa doraźna o charakterze plastycznym i rozbudowanej topografii powierzchni. Wyniki tych analiz wykazały, zatem, że uszkodzenia nie powstało na skutek przeciążenia eksploatacyjnego gąsienic, ale w wyniku innych czynników skutkujących obniżeniem wytrzymałości zmęczeniowej drutów kordowych.

Prezentowane w pracy wyniki badań miały na celu określenie wpływu eksploatacji gąsienic elastomerowych minikoparek ogólnobudowlanych na strukturę i wybrane własności mechaniczne oraz technologiczne stali perlitycznej stosowanej na druty ich kordu.

Przedmiotem badań były dwie gąsienice elastomerowe typu 332/L5153 pochodzące z minikoparek firmy JCB model 8018 CTS (rys. 3). Badane gąsienice różniły się stopniem eksploatacji, gąsienica Nr 1 była próbką nową, nieeksploatowaną, a gąsienica Nr 2 była próbką w stanie poeksploatacyjnym, wykorzystywaną do prac ogólnobudowlanych przez okres czasu wynoszący 1228 motogodzin.



Rys. 1. Uszkodzona gąsienica elastomerowa pochodząca z minikoparki JCB model 8018 CTS. Widoczny fragment stalowego kordu, który przebił warstwę gumy i doprowadził do uszkodzenia bieźnika (strzałka).



Rys. 2. Mikroskopowy obraz złomu zmęczeniowego pękniętego drutu pochodzącego z gąsienicy, pokazanej na rys. 1. Widoczna gładka strefa zmęczeniowa oraz strefa dorażna o rozbudowanej topografii powierzchni. SEM

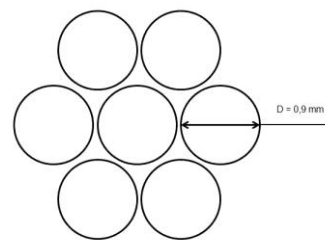


Rys. 3. Minikoparka firmy JCB model 8018 CTS, z której pochodziły badane gąsienice elastomerowe.

Do oceny wpływu eksploatacji gąsienic elastomerowych na strukturę i wybrane własności mechaniczne stali perlitycznej pobrano z ich stalowego kordu próbki drutów o średnicy $d=0,3$ mm. Badania makroskopowe rodzaju zastosowanego wzmocnienia wykazały, że we wszystkich gąsienicach występuje 36 linek stalowego kordu, rozłożonych w dwóch równoległych warstwach po 18 linek w każdej (rys. 4). Każda z linek kordu zbudowana jest z 7-miu identycznych splotek o średnicy 0,9 mm. Jedną z nich stanowi rdzeń, na którym owinięte są w postaci jednej warstwy pozostałe splotki (rys. 5). Linka kordu zwija się w kierunku prawym. Wszystkie splotki zbudowane są z 12 drutów o średnicy 0,3 mm i składają się z jednego drutu splotowego oraz nawiniętych na niego śrubowo dwóch warstw, pozostałych jedenastu drutów. Splotka wykonana jest ze zwiem w kierunku lewym.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny przez gąsienicę elastomerową Nr 1, widoczny sposób rozmieszczenia stalowego kordu.



Rys. 5. Schemat budowy stalowego kordu pokazanego na rys. 3, widoczne siedem spletek o średnicy 0,9mm.

Do badań mikroskopowych w stanie trawionym i nietrawionym wykorzystany został optyczny mikroskop świetlny NIKON ECLIPSE MA200 z oprogramowania NIS Elements BR, obserwacje były prowadzone przy powiększeniu od 100x do 1000x. Obserwacje mikrostruktur badanej stali prowadzone zostały również z zastosowaniem elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL JSM 6610A przy powiększeniach od 1000× do 10 000×. W trakcie badań stosowano napięcie przyspieszające 15 i 25 kV. Obserwacje prowadzono w kontraście materiałowym wykorzystując detektory SE.

Pomiary twardości badanych próbek wykonano metodą Vickersa przy użyciu mikrotwardościomierza MMT-X3 w warunkach zgodnych z normą PN-EN ISO 6507-2:1999. Czas trwania pomiaru wynosił 15 s, odbywał się pod obciążeniem 500 g.

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono w warunkach zgodnych z normą PN-EN ISO 6892-1:2010. Badania zrealizowano na maszynie wytrzymałościowej typu MTS 858 Mini Bionix. Z drutu wykonano próbki o początkowej długości pomiarowej $L_0 = 100$ mm. Próby rozciągania prowadzono ze stałą szybkością rozciągania kontrolowaną szybkością odkształcenia (metoda A wg. normy) i wynoszącą $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067$ 1/s aż do wystąpienia złomu. Wyznaczono podstawowe własności wytrzymałościowe materiału: wytrzymałość na rozciąganie R_m i przewężenie Z .

Analiza własności technologicznych obejmowała przeprowadzenie próby jednokierunkowego skręcania oraz próby dwukierunkowego przeginania badanych drutów, pobranych z kordu. Próbę jednokierunkowego skręcania wykonano w warunkach zgodnych z normą PN-ISO 7800:1996, jest to próba mająca na celu określenie przydatności materiału do procesów wytwórczych. Obejmuje ona skręcanie obciążonego drutu wokół własnej osi w jednym kierunku prowadzone aż do zerwania próbki. Badane próbki miały długość zgodną z normą PN-ISO 7800:1996, a zastosowane obciążenie nie przekraczało 2% nominalnego obciążenia zrywającego drut.

Próba przeginania dwukierunkowego wg. PN-ISO 7801: 1996 stosowana jest do określenia wytrzymałości drutu na odkształcenia plastyczne. Obejmuje ona wielokrotne dwukierunkowe przeginanie próbki o kąt 90° wokół wałków o średnicach określonych w normie PN-ISO 7801: 1996. Obie próby przeprowadzone zostały ze stałą prędkością, aż do wystąpienia złomu, pomiary wykonano w temperaturze otoczenia.

3. Wyniki badań

Badania makroskopowe gąsienicy Nr 1 wykazały, iż powierzchnia styku gąsienicy z podłożem była idealnie płaska, na powierzchni bieżnika zaobserwowano pozostałości procesu produkcyjnego w postaci liniowych zgrubień (rys. 6). Krawędzie bieżnika badanej gąsienicy były ostro zakończone, a ścianki segmentów jednolite. Materiał, z którego wykonano badany element był jednolity i nie wykazywał oznak starzenia, a grubość bieżnika wynosiła około 47 mm.

Badania makroskopowe gąsienicy Nr 2, próbki w stanie poeksploatacyjnym wykazały, że nosi ona znaczne ślady zużycia wynikające z użytkowania maszyny. Na jej powierzchni roboczej zaobserwowano wiele zmian i uszkodzeń wynikających z bliskiego kontaktu z twardym podłożem

(rys. 7). Krawędzie bieżnika gąsienicy były znacznie zaokrąglone, co wpływa na zmniejszoną trakcję maszyny podczas manewrowania w grząskim terenie. Kolejnym śladem eksploatacji były ubytki występujące w postaci wyrwanych kawałków gumy oraz przecięcia i podcięcia bieżnika. Najważniejszym a zarazem najbardziej niebezpiecznym objawem zużycia gąsienicy były widoczne pęknięcia poprzeczne, powstające na skutek manewrowania pojazdu wokół własnej osi na twardym np. betonowym lub asfaltowym podłożu. Powierzchnia bieżnika badanej gąsienicy była porowata i nosiła ślady zmian starzeniowych gumy, a jej grubość wynosiła około 40 mm.

Obserwacje mikroskopowe materiału badanych drutów przeprowadzone w stanie nietrawionym wykazały obecność dużej ilości wtrąceń niemetalicznych, głównie w postaci tlenków. Zanieczyszczenia rozmieszczone były punktowo i występowały w ilości od wzorca 3 do 4 wg. EN 10247:2007, co według danych literaturowych [11, 16, 20] przekracza maksymalną dopuszczalną zawartość wtrąceń niemetalicznych w stali perlitycznej przeznaczonej do produkcji drutów kordowych (rys. 8 i 9). Wytrzymałość zmęczeniowa stalowych drutów jest w dużym stopniu uzależniona od czystości metalurgicznej materiału. Obecność tak dużej ilości wtrąceń niemetalicznych, szczególnie w postaci kruchych tlenków, może powodować obniżenie ciągliwości materiału utrudniając procesy technologiczne, a w szczególnych przypadkach prowadzić nawet do pęknięcia drutów w trakcie eksploatacji.

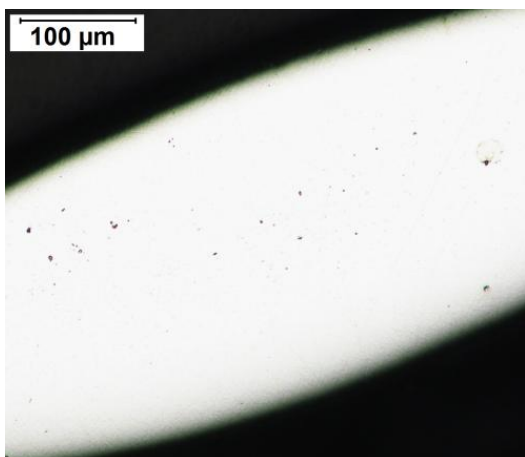
Badania mikroskopowe wykazały, że wszystkie badane druty, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 10323:2005 (U), wykonane zostały z niestopowej stali perlitycznej, a zastosowany proces ciągnięcia na zimno umożliwił uzyskanie dużego stopnia odkształcenia plastycznego, rzędu 80–90% (rys. 10 i 11). Wstępne badania mikroskopowe nie wykazały znaczących różnic w strukturze badanych próbek, ale dalsze obserwacje, z zastosowaniem skaningowej mikroskopii elektronowej, uwidoczniły wyraźny wpływ eksploatacji na strukturę badanego materiału (rys. 12 i 13). Wyniki analizy mikrostruktury wykazały, iż w trakcie eksploatacji gąsienicy materiał stalowego kordu ulega niszczeniu. Zaobserwowano obecność licznych nieciągłości struktury zorientowanych zgodnie z kierunkiem przeróbki plastycznej materiału, przyczyną ich powstawania była obecność w badanych materiałach wtrąceń niemetalicznych (rys. 13).



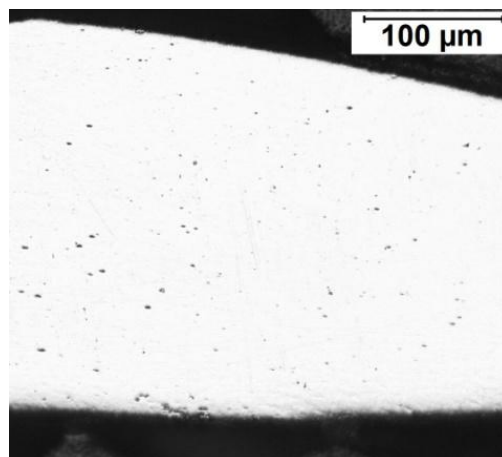
Rys. 6. Gąsienica elastomerowa Nr 1, próbka nieeksploatowana. Na powierzchni brak pęknięć i uszkodzeń, krawędzie bieżnika są ostro zakończone, a ścianki segmentów jednolite, widoczne pozostałości procesu produkcyjnego w postaci liniowych zgrubień.



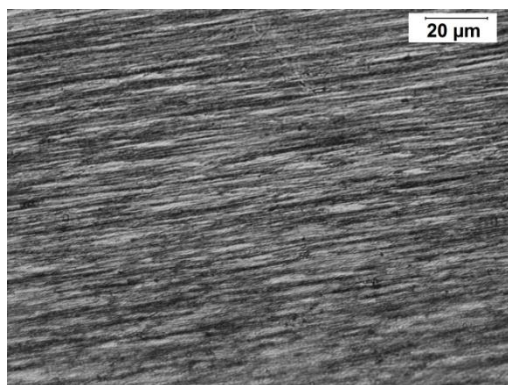
Rys. 7. Gąsienica elastomerowa Nr 2, próbka w stanie poeksploatacyjnym przez okres czasu wynoszący 1228 roboczogodzin. Na powierzchni widoczne liczne pęknięcia i uszkodzenia, krawędzie bieżnika znacznie zaokrąglone, a bieżnik porowaty.



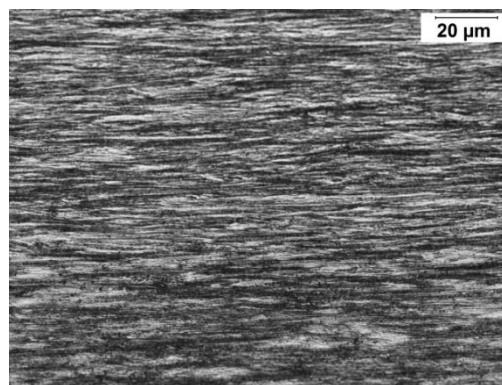
Rys. 8. Materiał drutu z kordu gąsienicy Nr 1, widoczne tlenkowe wtrącenia niemetaliczne w ilości równej wzorcowi 3 wg. PN-64/H-04510. Stan nietrawiony. Przekrój wzdłużny. LM



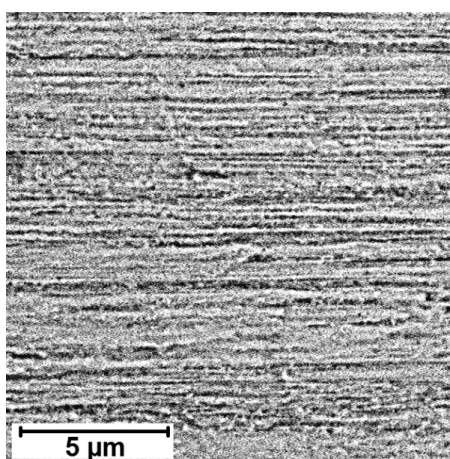
Rys. 9. Materiał drutu z kordu gąsienicy Nr 2, widoczne tlenkowe wtrącenia niemetaliczne w ilości równej wzorcowi 4 wg. PN-64/H-04510. Stan nietrawiony. Przekrój wzdłużny. LM



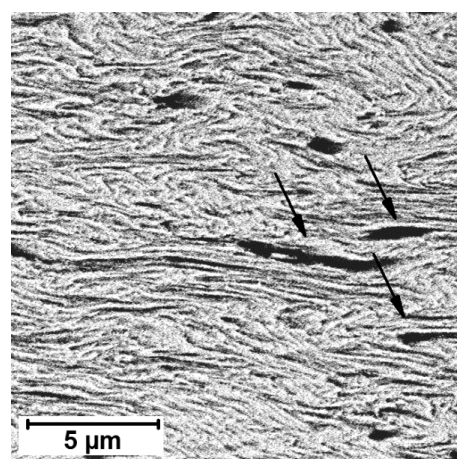
Rys. 10. Mikrostruktura próbki drutu, pochodzącego z kordu gąsienicy Nr 1, nowej. Widoczna silna tekstura zgniotu materiału wynosząca ok. 90%. Przekrój wzdłużny. LM



Rys. 11. Mikrostruktura próbki drutu pochodzącego z kordu gąsienicy Nr 2, eksploatowanej. Widoczna tekstura zgniotu materiału wynosząca ok. 80%. Przekrój wzdłużny. LM



Rys. 12. Mikrostruktura próbki drutu pochodzącego z kordu gąsienicy Nr 1, nieeksploatowanej. Widoczna silna tekstura zgniotu materiału powstała skutkiem ciągnięcia na zimno. Przekrój wzdłużny. SEM



Rys. 13. Mikrostruktura próbki drutu pochodzącego z kordu gąsienicy Nr 2, eksploatowanej. Widoczne liczne nieciągłości materiału, powstałe w trakcie użytkowania gąsienicy (czarne strzałki). Przekrój wzdłużny. SEM

Wyniki tych badań potwierdziły teorie Golisa [16] o negatywnym wpływie wtrąceń niemetalicznych na wytrzymałość drutów kordowych oraz teorię Zelina [30], wskazującą, iż główną przyczyną pęknięcia stali perlitycznej poddawanej eksploatacji są mikrorozwarstwienia powstające pomiędzy płytkami cementytu. Uzyskane wyniki badań wykazały, że wokół zanieczyszczeń powstają nieciągłości materiałowe zdolne przekroczyć wymiar krytyczny wady i spowodować pęknięcie drutu. Proces ten może mieć następujący przebieg:

- przy odkształceniu plastycznym powstają wokół wtrąceń niemetalicznych mikropory,
- mikropory przy postępującym odkształceniu plastycznym powiększają się i zbliżają do siebie,
- gdy mostki między porami stają się już wąskie kolejno ulegają zerwaniu,
- w wyniku zerwania mikropomostów następuje koalescencja nieciągłości w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia,
- w wyniku koalescencji nieciągłości, powstałe wokół wtrąceń niemetalicznych pory osiągają wymiar wady krytycznej, przy której pęknięcie rozwija się niestabilnie i prowadzi do zmęczeniowego zniszczenia elementu.

Wyniki badań wytrzymałościowych wykazały, że obserwowane w badaniach mikroskopowych nieciągłości struktury, znacząco wpływają na własności mechaniczne i technologiczne drutów (tab. 1). Następstwem eksploatacji gąsienicy elastomerowej, próbki Nr 2, jest wyraźne obniżenie własności wytrzymałościowych jej drutów jej kordu. Wytrzymałość na rozciąganie dla próbki drutu pochodzącego z kordu gąsienicy Nr 1 nieeksploatowanej, wyniosła ok. 3430 MPa, a dla próbki drutu pochodzącego z gąsienicy Nr 2, 2050 MPa. Materiał jest mniej wytrzymały, co wynika z faktu, iż podczas statycznej próby rozciągania nieciągłości znajdujące się wokół wtrąceń niemetalicznych powiększają się w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia przyspieszając zniszczenie próbki drutu.

Jednocześnie w wynikach badań wytrzymałościowych zaobserwowano, że wzrosła plastyczność materiału. Przewężenie z wartości 15% dla próbki nowej zwiększyło się do 18% dla próbki w stanie poeksploatacyjnym. Wzrost przewężenia w próbce eksploatowanej związany jest najprawdopodobniej nie ze zwiększeniem plastyczności materiału, ale z anihilacją nieciągłości materiałowych obserwowanych w badaniach mikroskopowych.

Interesującym również wydaje się znaczny spadek twardości materiału próbek poeksploatacyjnych. Pomiarы wykonane zostały dla materiałów pobranych bezpośrednio z kordu gąsienic. Twardość dla próbki drutu z gąsienicy nowej równa była 742 HV_{0,5}, a dla próbki drutu z gąsienicy po eksploatacji obniżyła się do wartości również ok. 621 HV_{0,5} (tab. 1). Spadek twardości można tłumaczyć obecnością nieciągłości w strukturze badanych drutów. Zwiększenie porowatości materiału, przekłada się bezpośrednio na obniżenie twardości.

Tab. 1. Wyniki pomiarów własności mechanicznych próbek badanych drutów.

PRÓBKA	R _m _{śr} [MPa]	Z _{śr} [%]	HV _{śr} 0,5
DRUT Z KORDU GĄSIENICY Nr 1	3430 ± 100	15 ± 2	742 ± 20
DRUT Z KORDU GĄSIENICY Nr 2	2050 ± 100	18 ± 2	621 ± 20

W wyniku przeprowadzonych prób technologicznych, jednokierunkowego skręcania oraz dwukierunkowego przeginania, badanych drutów stwierdzono, że obserwowany w poprzednich badaniach wzrost przewężenia w próbkach eksploatowanych zdecydowanie nie jest związany ze zwiększeniem plastyczności materiału (tab. 2). Plastyczność materiału wyraźnie spada, liczba obrotów w próbie skręcania z wartości 171 obniża się do wartości 84, a liczba przegięć w próbie przeginania z wartości 103 obniża się do wartości 38. Potwierdza to zatem założenie, że wzrost przewężenia w próbce eksploatowanej nie jest związany z poprawą plastyczności, ale jest następstwem anihilacji powstałych rozwarstwień materiałowych.

Tab. 2. Wyniki prób technologicznych badanych drutów.

PRÓBKA	ŚREDNIA LICZBA OBROTÓW W PRÓBIE SKRĘCANIA	ŚREDNIA LICZBA PRZEGIEĆ W PRÓBIE PRZEGINANIA
DRUT Z KORDU GAŚIENICY Nr 1	171 ± 10	103 ± 10
DRUT Z KORDU GAŚIENICY Nr 2	84 ± 5	38 ± 5

4. Wnioski

W ostatnich latach obserwuje się na świecie niesłabnące zapotrzebowanie na szybkie i niezawodne środki transportu charakteryzujące się dodatkowo dużą ładownością. Ogumienie samochodów osobowych, dostawczych, ciężarowych, autobusów oraz maszyn rolniczych, górniczych czy specjalistycznego sprzętu budowlanego nie może być już dłużej zbrojone przędzą, wiskożą lub nylonem. Do wzmocnienia opon, gaśienic, taśm transportowych jak i węży ciśnieniowych stosuje się obecnie wysoko wytrzymałe druty, wykonane z niestopowej stali perlitycznej. Niestety jednym z problemów szeroko opisywanych w literaturze jest pękanie stali perlitycznej będącej w trakcie eksploatacji.

Wyniki badań faktograficznych uszkodzonej gaśienicy pokazały, że często występujące w praktyce ogólnobudowlanej przerwanie ciągłości drutów stalowego kordu nie jest następstwem nieprawidłowej eksploatacji. Zmęczeniowy charakter pęknięcia nie wynika ze sposobu i czasu eksploatacji, ale bezpośrednio z jakości metalurgicznej materiału drutu kordowego.

Teorii opisujących przyczyny pęknięcia stali perlitycznej będącej w trakcie eksploatacji jest bardzo wiele. Według Golisa [16], wytrzymałość zmęczeniowa drutów kordowych jest w dużym stopniu uzależniona od stopnia zanieczyszczenia materiału wtrąceniami niemetalicznymi, a szczególnie od zawartości tlenków, krzemianów i siarczków. Autor ten wyraźnie wskazuje, że maksymalna dopuszczalna zawartość wtrąceń niemetalicznych w niestopowej stali perlitycznej, gatunków D75, D78, D80 i D83 przeznaczonej do produkcji drutów kordowych nie powinna przekraczać wielkości wzorca nr 2 według normy EN 10247:2007.

Obserwacje mikroskopowe materiału drutów kordowych pochodzących z badanych gaśienic, przeprowadzone w stanie nietrawionym, wykazały obecność dużej ilości wtrąceń niemetalicznych, głównie w postaci tlenków. Zanieczyszczenia rozmieszczone były punktowo i występowały w ilości od wzorca 3 do 4 wg. EN 10247:2007. Jednocześnie wyniki dalszych analiz mikroskopowych wykazały, iż w trakcie eksploatacji gaśienic materiał stalowego kordu wyraźnie ulega niszczeniu. Zaobserwowano obecność licznych nieciągłości struktury, a szczegółowa analiza mikroskopowa wykazała, że wokół kruchych wydzielen tlenkowych powstają mikropory, które przy postępującym odkształceniu plastycznym powiększają się i zbliżają do siebie osiągając coraz większe rozmiary.

W pracy Zelina [30] można przeczytać, że na skutek odkształceń sprężystych powstają poziome mikrorozwarstwienia pojedynczych płytek cementytu. Podczas eksploatacji druty kordowe poddawane są złożonemu stanowi naprężeń w zakresie sprężystym, co tłumaczy fakt, iż obserwowane nieciągłości struktury zorientowane były równolegle do pasmowo ułożonych płytek cementytu.

Następstwem obserwowanych zmian strukturalnych materiału badanych drutów kordowych było istotne obniżenie ich własności wytrzymałościowych oraz technologicznych. Obniżenie wytrzymałości na rozciąganie wynikało z faktu, iż podczas statycznej próby rozciągania nieciągłości znajdujące się wokół wtrąceń niemetalicznych powiększają się w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia, a po osiągnięciu wymiaru wady krytycznej przyspieszają zniszczenie próbki drutu. Ta sama zależność tłumaczy wyniki badań technologicznych, jednokierunkowego skręcania oraz dwukierunkowego przeginania. Wyniki dla obu prób wskazują na spadek plastyczności materiału na skutek jego eksploatacji, co jest następstwem anihilacji opisywanych nieciągłości materiałowych. Spadek twardości można również tłumaczyć obecnością nieciągłości w strukturze badanych drutów. Im dłużej materiał był poddawany eksploatacji, tym powiększała się porowatość materiału, przekładając się bezpośrednio na obniżenie twardości.

Literatura

1. Adamczyk J. Inżynieria materiałów metalowych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2004.
2. Ashby MF, Jones DRH. Engineering Materials: An Introduction to Microstructures Processing and Design. Oxford: Elsevier, 2005.
3. Ashby MF, Jones DRH. Engineering Materials: An Introduction to Microstructures Application and Design. Oxford: Elsevier, 2005.
4. Berisha B, Raemy C, Becker C, Hora P. Multiscale modeling of failure initiation in a ferritic–pearlitic steel, *Acta Materialia*, 2015; 100: 11-18.
5. Burdziński Z. Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1972.
6. Cieśla M, Herian J, Junak G. Influence of pearlite morphology on creeping characteristic curves of R260 steel, *Key Engineering Materials*, 2014; 598: 39-44.
7. Czabanowski R. Numeryczna analiza obciążeń wybranych elementów podwozia z gąsienicami elastomerowymi, *Przegląd Mechaniczny*, 2010; 7(8): 30-36
8. Czarski A, Skowronek T, Matusiewicz P. Stability of a Lamellar Structure – Effect of the True Interlamellar Spacing on the Durability of a Pearlite Colony, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015; 60(4): 2499-2503.
9. Danoix F, Julien D, Sauvage X, Copreaux J. Direct evidence of cementite dissolution in drawn pearlitic steels observed by tomographic atom probe, *Materials Science and Engineering: A*, 1998; 250(1): 8-13.
10. De Knijf D. Optimization and characterization of a quenching and partitioning heat treatment on a low carbon steel, *Book of Abstracts Modern Steels MS2014 Poland*, 2014: 21-22

11. Dobrzański LA. Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Warszawa: WNT, 2006.
12. Embury JD, Fisher RM, The structure and properties of drawn pearlite, *Acta Metallurgica*, 1966; 14: 147-159.
13. Fedorko G, Molnar V, Ferková Ž, Tomašková M. Possibilities of failure analysis for steel cord conveyor belts using knowledge obtained from non-destructive testing of steel ropes, *Engineering Failure Analysis*, 2016; 67: 33-45.
14. Feng F. Texture inheritance of cold drawn pearlite steel wires after austenitisation, *Materials Science&Engineering*, 2014; 618(A): 14-21.
15. Gavriljuk VG. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation, *Materials Science and Engineering*, 2003; 345(A): 81-89.
16. Golis B, Błażejowski Z, Pilarczyk JW. Druty stalowe do zbrojenia opon. Częstochowa: Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, 1998.
17. Gridnev VN, Gavriljuk VG, Meshkov YY. Strength and plasticity of cold-worked steel. Kiev: Naukova Dumka, 1974.
18. Grygier D, Rutkowska-Gorczyca M, Jasiński M, Dudziński W. The structural and strength changes resulting from modification of heat treatment of high carbon steel, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016; 61(2B): 971-976.
19. Grygier D, Rutkowska-Gorczyca M. Influence of operating conditions of the steel cord on the structure and selected mechanical and technological properties of high carbon steel, *International Journal of Engineering Research & Science*, 2015; 2(4): 1-6.
20. Grygier D. Analysis of the causes of damage to the wires of the steel belt of car tires, *Interdisciplinary Journal of Engineering Sciences*, 2016; 4(1): 45-49.

21. Ivanisenko Y, Lojkowski W, Valiev RZ, Fecht HJ. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion, *Acta Materialia* 2003; 51(18): 5555-5570.
22. Ivanisenko Y, Sauvage X. The role of carbon segregation on nanocrystallization of pearlitic steels processed by severe plastic deformation, *Journal of Material Science* 2007; 42: 1615-1621.
23. Izotov V.I., et al., Influence of a pearlite fineness on the mechanical properties, deformation behavior and fracture characteristic of carbon steel, *The Physics of Metals and Metallography*, Vol. 106, No. 5, 2007
24. Izotov VI, Pozdnyakov VA, Luk'yanenko EV, Usanova OYu, Filippov GA. Study of slightly etched fracture surface of a pearlitic-ferritic steel by scanning electron microscopy, *The Physics of Metals and Metallography* 2007; 103(5): 519-529.
25. Knut A M, Ekh M, Brouzoulis J, Ahlström J. Modeling evolution of anisotropy in pearlitic steel during cold working, 28th Nordic Seminar on Computational Mechanics NSCM-28 Tallin 2015: 111-114.
26. Kulikowski K, Szpica D. Determination of directional stiffnesses of vehicles' tires under a static load operation, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(1): 66-72.
27. Languillaume J, Kapelski G, Baudelet B. Cementite dissolution in heavily cold drawn pearlitic steel wires *Acta Materialia* 1997; 45(3): 241-245.
28. Mendygrał Z. *Encyklopedia Techniki Wojskowej*. Warszawa: Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1978.
29. Sauvage X, Thily L, Blavette D. Microstructure evolution during drawing of a pearlitic steel containing 0.7 wt.% copper *Scripta Materialia* 2002; 46: 459-464.

30. Zelin M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing *Acta Materialia* 2002; 50: 4431–4447.
31. Zhang M-X, Kelly PM. The morphology and formation mechanism of pearlite in steel *Material Characterization* 2009; 60: 545-554.