

Kazimierz DROZD¹
Leszek GARDYŃSKI¹

ANALIZA PRZYPADKU PRZYSPIESZONEGO ZUŻYCIA LINY WYCIĄGOWEJ

W pracy przedstawiono wyniki badania liny urządzenia wyciągowego. Była to lina stalowa wycofana z eksploatacji z powodu uszkodzeń. Zewnętrzne druty splotek ulegały wydłużeniu oraz pękaniu. Przelomy powinny mieć charakter zmęczeniowy z odkształceniem strefy przelomu lecz obserwowano przelomy doraźne bez przewężenia świadczące o kruchości materiału. Kruchość była obserwowana wyłącznie miejscowo dlatego prawdopodobną przyczyną była niejednorodność materiału w wyniku obróbki cieplnej.

CASE STUDY OF ACCELERATED WEAR OF LIFT ROPE

The results of testing of lift rope are shown in the paper. The rope was from steel wire and was not operated because of damages. The outer wires of strand ropes were pushed by internal wires and elongated or even broken. However the cracks should be ductile with displacement in the fracture area, the observed cracks were brittle and there were not contraction of wires. The brittleness were noticeable only locally and it's probably reason were partial heterogeneity of heat treatment.

1. WSTĘP

Liny stalowe są często wykorzystywane do transportu, zwłaszcza pionowego którego szczególnym rodzajem są urządzenia wyciągowe w kopalniach. Od tego rodzaju urządzeń wymaga się długoletniej, niezawodnej pracy przy całodobowym wykorzystaniu. Drugim aspektem jest bezpieczeństwo, zwłaszcza gdy urządzenie służy do transportu ludzi. Stosowane liny, w zależności od konstrukcji urządzenia i głębokości szybu, mają znaczne długości co wpływa na ich wysoką cenę. Jednocześnie wymiana lin wiąże się z przestojem urządzenia i przynosi wymierne straty. Próba sprostania wszystkim kryteriom stanowi wyzwanie dla producenta liny. [1]

2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań była lina przeciwwzita $\Phi 50$ WS 6x36 + FE – Z/z (S/z)-n-I-g-1770 wykonana wg DIN 21254-9. Druty liny były pokryte powłoką cynkową. Nominalna wytrzymałość nie powinna być mniejsza niż $R_m = 1580$ MPa. Nominalna siła zrywająca

¹ Politechnika Lubelska, Katedra Inżynierii Materiałowej; 20-618 Lublin; ul. Nadbystrzycka 36
Tel. +48 81 5384215; Fax: +48 81 5384214, E-mail: k.drozd@pollub.pl

linę $P_0 = 1850$ kN. Przekrój metaliczny liny wynosił 1212 mm². Masa jednostkowa liny wynosiła $10,6$ kg/mb. Linę stanowiły zwoje i splotki opisane wzorem (1). Przekrój poprzeczny badanej liny oraz schemat układu splotek przedstawiono na rys. 1.

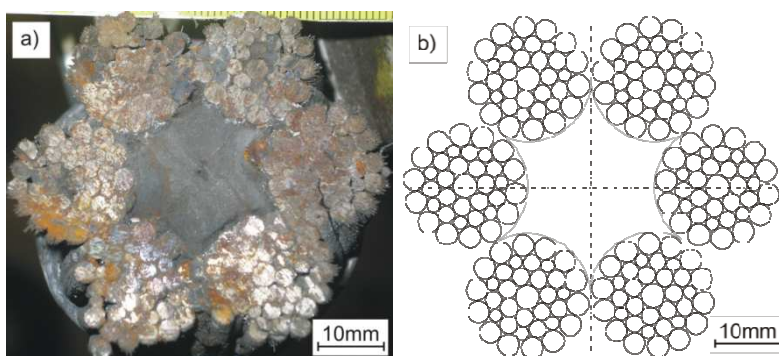
$$6(3,2 \text{ mm} + 7 \times 2,4 \text{ mm} + 7 \times 2,3 \text{ mm} / 7 \times 1,8 \text{ mm} + 14 \times 2,9 \text{ mm}) \quad (1)$$

gdzie: 6 – liczba splotek w linie,

3,2 mm – średnica drutu centralnego,

2,9 mm – średnica drutu warstwy zewnętrznej w splotce,

1,8 ÷ 2,4 mm – średnice drutów wewnętrznych w splotce.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny badanej liny: a) widok; b) schemat układu splotek

Lina była eksploatowana przez okres 12 miesięcy i została zdjęta z powodu deformacji splotek. Czas użytkowania był dość krótki, zważywszy że gwarancja producentów na liny tej konstrukcji wynosi co najmniej 15 miesięcy. Uszkodzenie liny było obserwowane jako wypychania drutów wewnętrznych na zewnątrz liny.

Dla odcinków uszkodzonej liny wykonano kompleksowe badania mające na celu ustalenie przyczyn uszkodzeń. W skład programu badań wchodziły oględziny w miejscu eksploatacji, badania makroskopowe i fraktograficzne, badania wytrzymałości drutów na rozciąganie, badania składu chemicznego materiału drutów a także badania ich twardości. Uszkodzone druty poddano badaniom metalograficznym mikroskopowym.

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

3.1. Oględziny

W ramach badań wykonano oględziny odcinków lin zdemontowanych po wycofaniu z eksploatacji oraz bębnow z linami nie używanymi (rys. 2). Na linach używanych występowały uszkodzenia, które były przyczyną wycofania tych lin z eksploatacji. Ponadto oględzinom poddano maszynę wyciągową oraz rezerwowe koło linowe z polimerowymi wkładkami nośnymi (rys. 3). Zamontowanie wkładek miało na celu zwiększenie trwałości zarówno koła jak i liny. Tego rodzaju wkładki są powszechnie stosowane w kołach urządzeń wyciągowych. Materiały, funkcje i charakterystykę wkładek można znaleźć w literaturze krajowej i zagranicznej [1-3].



Rys. 2. Zwój liny przed założeniem do urządzenia wyciągowego

Na trwałość lin wpływa około 50 parametrów. Zastosowanie wykładziny polimerowej zwiększa trwałość zmęczeniową liny od kilkudziesięciu do kilkuset procent. Jednocześnie zbyt słabe nasączenie rdzenia liny smarem może znacznie zmniejszyć trwałość zmęczeniową liny. Jak podaje się w literaturze, wada taka może spowodować ponad dwukrotne zmniejszenie trwałości w porównaniu z trwałością liny prawidłowo nasączonej przez wytwórcę [4-6].



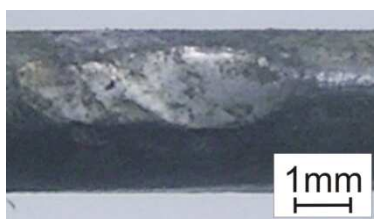
Rys. 3. Rowek koła linowego z wkładkami polimerowymi

Koła linowe mają średnicę 5m, koła pędne 6m a więc średnica najmniejszego z kół jest 100 krotnie większa od średnicy liny. Koło pędne wyłożono wykładziną Modar R3/Mz, koła linowe górne nie zostały wyposażone w wykładziny. Koła dolne mają wykładzinę z polimeru Modar R-5 Tk/Kk. Średni nacisk jednostkowy liny na rowek linowy organu pędnego określono na 1,65 MPa.



Rys. 4. Deformacje splotek oraz pęknięte druty w jednej ze splotek

W czasie oględzin stwierdzono nienaturalny, dla lin o liniowym styku drutów, sposób zużycia w postaci deformacji splotek oraz licznie występujące skupiska pękniętych drutów (rys. 4). Po pierwszych 5 miesiącach eksploatacji, na odcinkach współpracujących z kołami linowymi, obserwowano lokalne wady w postaci drutów warstwy zewnętrznej wystających poza obrys splotek. Druty te były wypychane przez druty warstwy środkowej. Później zaczęły powstawać pęknięcia drutów warstwy zewnętrznej i warstwy środkowej.



Rys. 5. *Drut uszkodzonej splotki z wytarciem i wgnieceniem z powodu braku styku liniowego. Widoczne ogniska korozyjne*

Oprócz deformacji i pękania nie stwierdzono innych uszkodzeń, w szczególności korozji drutów oraz skutków istotnego zużycia ściernego, co często bywa przyczyną uszkodzeń [7]. Pęknięcia występowały jedynie w dwu splotkach obu badanych odcinków lin („N” i „S”). Odległości między sąsiednimi skupiskami pęknięć drutów były nie mniejsze od skoku liny. Na drutach zewnętrznych stwierdzono niewielkie lokalne starcia (rys. 5). Z przytoczonych wyników pomiarów średnicy i skoku liny wynika, że skok był wielokrotnością około 7 średnic. Z danych literaturowych [8] wynika, że skok powinien być większy od średnicy około 7,5 razy. Zwraca też uwagę powiększona wartość średnicy liny, nawet do 54 mm, co może być skutkiem deformacji. W strefach deformacji stwierdzono brak liniowego styku drutów.

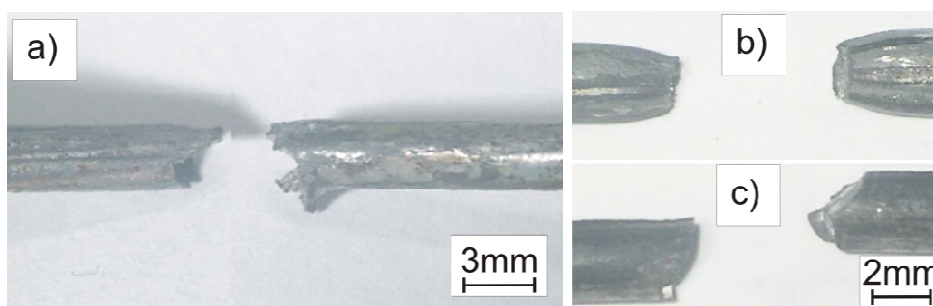
Postawiono tezę, że występowanie uszkodzeń wyłącznie w dwu splotkach lin może świadczyć o nieprawidłowym ich wykonaniu lub może być skutkiem wad materiałowych albo zastosowania materiału różnego pochodzenia i o różnych właściwościach. Wystąpienie uszkodzeń tylko w jednej splotce może także świadczyć o niewłaściwym zwinięciu liny.

3.2. Badania makroskopowe odcinka liny i fraktografia przełomów



Rys. 6. *Jedna ze splotek badanej liny. Pęknięty drut warstwy zewnętrznej. Drut warstwy wewnętrznej odkształcony*

Do szczegółowych badań wybrano odcinek liny prawej, przeciwwzitej (sZ), o liniowym styku drutów w splotce. Była to lina typu Warrington-Seale [9]. Średnica liny wynosiła około 50,5mm, a skok około 363mm. W jednej ze splotek badanego odcinka znaleziono miejsce zdeformowane, w którym jeden drut warstwy wewnętrznej o średnicy ok. 2,30 mm wystawał ponad warstwę zewnętrzną, a dwa inne druty wewnętrznej warstwy (1,8 mm) i zewnętrznej (2,9 mm) były pęknięte (rys. 6).



Rys. 7. Przełom drutów zewnętrznej warstwy uszkodzonej splotki: a) kruchy przełom eksploatacyjny z wytarciami widocznymi na prawym fragmencie; b) typowy kształt obszaru przełomu plastycznego otrzymanego podczas badania wytrzymałościowego; c) przełom kruchy uzyskany podczas rozciągania drutu zewnętrznej warstwy uszkodzonej splotki

Wszystkie przełomy występujące w badanej lince miały charakter kruchy. Przykład takiego przełomu przedstawiono na rys. 7a. Podobny charakter miał przełom uzyskany podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przedstawiony na rys. 7c. W strefie przełomu niemal nie występowało odkształcenie plastyczne, co jest nietypowe dlatego, że materiał ten powinien charakteryzować się wydłużeniem (rys. 7b) o wartości około 15 % i odpowiednim przewężeniem [10]. Taki charakter przełomu wskazuje na specyficzne właściwości materiału uszkodzonych drutów. Właściwości te były kształtowane w procesie wytwarzania, dlatego konieczne były dalsze badania, w szczególności struktury materiału.

3.3. Badania wytrzymałościowe

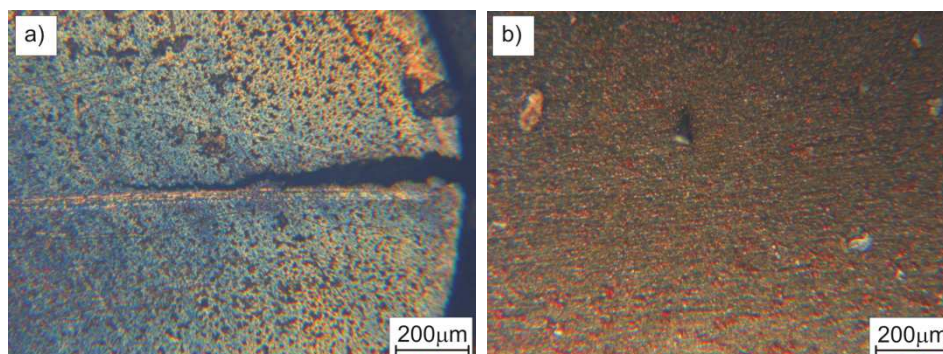
Przeprowadzono badania wytrzymałości doraźnej drutów uszkodzonej splotki. Wykazały one nieznacznie większą siłę zrywającą w stosunku do danych podawanych przez wytwórcę. Można to tłumaczyć przebyciem przez liny okresem rocznej eksploatacji. Wyłączając centralny drut badanej splotki, określona w badaniach wytrzymałościowych wytrzymałość doraźna drutów wahała się w granicach 1815÷1965MPa, a więc była dość „stabilna”, z wyjątkiem dwu drutów o średnicy 2,9mm, dla których zanotowano wyniki 1387 i 1673 MPa. Wytrzymałość doraźna drutu centralnego o średnicy 3,2 mm wynosiła 2339 MPa.

Dla drutu centralnego (średnica 3,2 mm) uzyskano $R_m = 1679$ MPa, dla drutów 2,3 i 2,4 mm uzyskano $R_m = 1637 \div 1812$ MPa, dla drutów 1,80 mm uzyskano $R_m = 1650 \div 1737$ MPa, dla drutów 2,9 mm uzyskano $R_m = 1714 \div 1786$ MPa. Przy czym próbka

z pękniętego drutu o średnicy 2,9 mm pękła przy znacznie mniejszym naprężeniu (1514 MPa), w odmienny niż pozostałe próbki sposób. Był to kruchy przełom bez przewężenia w miejscu lokalnego wytarcia drutu spowodowanego utratą liniowości styku w wyniku deformacji. Przełom prawdopodobnie rozwinął się w miejscu wcześniejszego częściowego pęknięcia o charakterze zmęczeniowym. Po zbadaniu siły zrywającej dla wszystkich drutów, określono sumaryczną siłę o wartości 2072 kN potrzebną do zerwania całej liny.

3.4. Badania mikrostruktury materiału

Do badań struktury materiału wykonano zglądy metalograficzne próbek pochodzących z pękniętych drutów uszkodzonej splotki (rys. 8). Zglądy trawiono nitałem (Mi1Fe). Zaobserwowano wyraźnie kierunkową strukturę, wynikającą z przeróbki plastycznej, nie usuniętą w wyniku obróbki cieplnej. W niektórych miejscach występują twarde wydzielenia mogące zwiększać kruchość. W literaturze [11] podaje się, że struktura taka jest jednym z najczęstszych błędów wytwarzania materiału na liny.



Rys. 8. Mikrostruktura badanego materiału po trawieniu odczynnikiem Mi1Fe:
a) struktura pasmowa i pęknięcie zmęczeniowe rozwijające się śladem wtrąceń – pole jasne; b) wtrącenia powodujące kruchość widoczne przy badaniu w polu ciemnym

Wyniki badania mikrostruktury wskazują, że prawdopodobną przyczyną uszkodzeń liny może być niejednorodność struktury materiału. Zwraca uwagę pasmowość struktury oraz występowanie wtrąceń niemetalicznych. Na jednym ze zglądów (rys. 8a) widoczne jest pęknięcie zmęczeniowe postępujące wzdłuż wtrąceń. Można wnioskować o niestarannie dobranych parametrach obróbki cieplnej dla konkretnych drutów a co najmniej w okresowo występujących miejscach. To jest prawdopodobna przyczyna zmniejszonej trwałości badanych lin.

3.5. Pomiary twardości i badania składu chemicznego materiału

Aparatem Vickers'a zmierzono twardość materiału grubszego z dwu pękniętych drutów. Wynosiła ona średnio 470HV, co odpowiada wytrzymałości doraźnej o wartości

około 1520 MPa. Jest to wartość porównywalna do podawanej przez producenta nominalnej wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 1580$ MPa.

Tab. 1. Skład chemiczny materiału badanych drutów. Zawartość żelaza - reszta

Pierwiastek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb
Zawartość [% masy]	0,71	0,80	0,33	0,005	0,011	0,094	0,047	0,064	0,011	0,016

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że zawartość węgla w stali, z której wykonano uszkodzone druty wynosi nieco ponad 0,7 %. Zestawienie składników stopowych materiału uszkodzonych drutów zawarto w tab. 1. Skład chemiczny materiału jest prawidłowy, zwłaszcza jeśli brać pod uwagę pierwiastki mogące tworzyć twarde wtrącenia lub zwiększające kruchość i powodujące pękanie (fosfor, siarka, miedź, chrom). Z uwagi na podwyższoną zawartość manganu należałoby tę stal normalizować. Jednak normalizowanie, ze względu na znaczną zawartość węgla w stali, nie jest tutaj korzystne. Przy tej zawartości węgla wskazane byłoby patentowanie, lecz wtedy w stali powinno być mniej manganu [11]. Niezależnie od powyższych rozważań, w składzie badanej stali nie można doszukiwać się przyczyn pęknięć, zwłaszcza, że – jak wynika z innych ustaleń – druty przedostatniej warstwy w splotce najpierw „wychodziły” na zewnątrz, a pękały dopiero później.

4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań można określić przyczynę występowania zmniejszonej trwałości lin urządzeń wyciągowych. Najbardziej przydatne do tego celu wydają się badania mikrostruktury i badania wytrzymałościowe.

Zweryfikowano, wysunięte na wstępie, możliwe przyczyny występowania uszkodzeń w badanych linach mające podłoże eksploatacyjne oraz materiałowe i strukturalne. Badania potwierdziły niekorzystną strukturę materiału w obszarach uszkodzeń badanych drutów. Podstawową przyczyną uszkodzeń badanych lin była niestaranna obróbka cieplna materiału. Te druty w badanej splotce, które miały strukturę zawierającą wtrącenia niemetaliczne charakteryzowały się mniej korzystnymi wartościami parametrów wytrzymałościowych, które są decydujące o trwałości eksploatacyjnej liny urządzenia wyciągowego.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Golis B. et al: *Liny stalowe*. Wyd. Pol. Częstochowskiej. Częstochowa 2006
- [2] Hobbs R.E., Nabijou S.: *Change in wire curvature as a wire is bent over a sheave*. Journal of Strain Analysis 30 (1995), 271–281
- [3] Neyman A., Olszewski O.: *Research on fretting wear dependence of hardness ratio and friction coefficient of fretted couple*. Wear 102–104 (1993) 939–943
- [4] Tytko A.: *Eksploatacja lin stalowych*. Wyd. Naukowe Śląsk. Katowice 2003

-
- [5] Elata D., Ashkenazi R., Weiss, M.: *The mechanical behaviour of wire rope with internal wire rope core*. International Journal of Solids and Structures 41 (2004), 1157–1172
 - [6] Małecki J., Tytko A., Wróbel T.: *Wpływ oddziaływań dynamicznych na trwałość eksploatacyjną lin nośnych górniczych wyciągów szybowych*. Maszyny Górnicze 27 (2009), 50-57
 - [7] Jessop S.A.: *Loss of metallic area of corroded wire ropes*. Internal Report, Department of Mining Engineering and Mine Surveying, Western Australian School of Mines, 1997
 - [8] Łuksza J. et al: *Druty ze stali i stopów specjalnych*. WNT, Warszawa 2006
 - [9] Tytko A.: *Eksploatacja lin stalowych*. Wyd. Śląsk, Katowice 2003
 - [10] Beretta S., Boniardi M.: *Fatigue strength and surface quality of eutectoid steel wires*. International Journal of Fatigue 21 (1999) 329–335
 - [11] Yilmaz M.: *Failures during the production and usage of steel wires*. Journal of Materials Processing Technology 171 (2006), 232-239