

Tadeusz LAMBER

Adam KWAŚNICKI

Andrzej WARCHOŁ

## OCENA ODOPORNOSCI NA PĘKANIE MATERIAŁU STOSOWANEGO NA ŁAŃCUCHY GÓRNICZE

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono propozycje zastosowania metod liniowej mechaniki pęknięcia do oceny odporności na pęknięcie materiałów o podwyższonej wytrzymałości, przeznaczonych do produkcji urządzeń ciągnowych w górnictwie.

Trudna do wykonania znormalizowane próbki stosowane do wyznaczania parametrów określających odporność na pęknięcie, zastąpiono próbkami okrągłymi z karbem pierścieniowym, które można łatwo wykonać z materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów. Na przykładzie stali G25HGNM w postaci kęsów  $\square$  100 x 100 mm oraz prętów  $\varnothing$  18 mm ustalono doświadczalnie zależność między parametrami uzyskanymi na dwu rodzajach próbek.

Z uwagi na występujące przeciążenia górniczych ciągów łańcuchowych w czasie eksploatacji, do oceny ich trwałości przyjęto badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli, które dość dobrze odzwierciedlają przebieg rzeczywistych obciążeń na obiekcie.

### Wprowadzenie

Górniczne ciąga łańcuchowe, tak z uwagi na wysokie stałe i zmienne obciążenia, jak i wymogi odnośnie do ich trwałości w określonych warunkach eksploatacji [1, 2, 3] wykonuje się obecnie ze stali o podwyższonej wytrzymałości. Stale te przy wysokich własnościach mechanicznych wykazują jednak skłonność do kruchego pęknięcia. W związku z tym zachodzi konieczność, oprócz ogólnie stosowanych badań własności wytrzymałościowych, przeprowadzenie badań odporności na pęknięcie.

W pracach Instytutu Inżynierii Materiałowej [1, 5, 6] podane sposoby określania wartości współczynników  $K_{IC}$  i  $\delta_c$  charakteryzujących odporność na pęknięcie na przykładzie stali G25HGNM jako stali o podwyższonej wytrzymałości stosowanej do produkcji górniczych łańcuchów ogniowych. Z uwagi na trudności techniczne wykonania próbek do wyznaczania  $K_{IC}$  dla materiału przygotowanego do produkcji łańcuchów górniczych, do badań przyjęto próbkę o mniejszych rozmiarach, uzasadniając eksperymentalnie jej przydatność do określania odporności badanej stali na pęknięcie [1, 6].

Górniczne ciąga łańcuchowe w czasie ich eksploatacji podlegają powtarzającym się, przy małej liczbie cykli, przeciążeniom. Z tych względów proponuje się [1] wprowadzenie badań zmęczeniowych w zakresie małej liczby

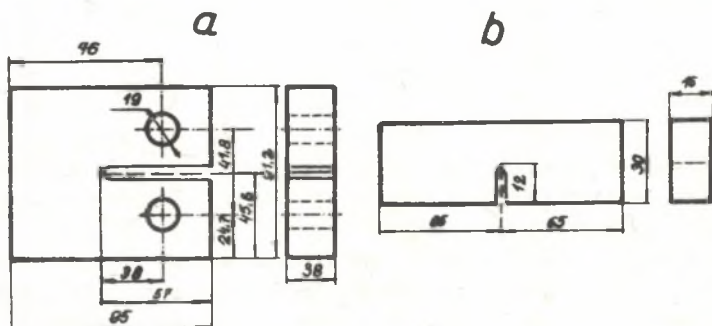
cykli, charakteryzujących się wysokim poziomem naprężeń bliskim lub równym granicy plastyczności. Badania takie ze względu na odmienny mechanizm dekohezji zmęczeniowej materiału w porównaniu z mechanizmem, jaki ma miejsce w czasie klasycznych badań na zmęczenie, lepiej charakteryzują przydatność badanego materiału przeznaczanego do produkcji górniczych ciągów łańcuchowych.

Eksperymentalne metody oceny odporności na pękanie stali o podwyższonej wytrzymałości przeznaczonych do produkcji górniczych ciągów łańcuchowych

Do oceny przydatności materiału o podwyższonej wytrzymałości na określoną konstrukcję obecnie coraz częściej stosuje się koncepcje liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia, a w szczególności tzw. charakterystyki mechaniki pęknięcia. Do podstawowych takich charakterystyk należą odporność na pękanie  $K_{IC}$  oraz wartość krytycznego rozwarcia szczeliny  $\delta_C$ .

Rozmiary próbek określone przez normę ASTM-E-399-70T oraz angielską normę BS 5762:1979, jakich należy użyć do wyznaczenia tych wielkości przy mimośrodowym rozciąganiu lub zginaniu, są znaczne i zależą w głównej mierze od granicy plastyczności i odporności na pękanie badanego materiału (rys. 1). Rozmiar próbek wynika z faktu, że w czasie próby realizowany musi być płaski stan odkształcenia w obszarze przyległym do dna szczeliny zmęczeniowej naniesionej w próbce. Jest to bowiem jeden z podstawowych warunków, jaki należy spełnić zgodnie z wymaganiami ustalonymi w mechanice pęknięcia.

Materiał przeznaczony do produkcji ogniowych łańcuchów górniczych dostarczany jest w postaci walcówki  $\varnothing$  18, 24, 26, 30, 32 mm.



Rys. 1. Próbkę do określania  $K_{IC}$   
a) za pomocą rozciągania, b) za pomocą zginania

Ponieważ rozmiary próbek znormalizowanych do badań odporności na pękanie są większe od wymiarów poprzecznych walcówki, dlatego materiał na próbki pobiera się we wcześniejszej fazie przeróbki plastycznej, np. z kęsa o wymiarach  $\square$  100 x 100 mm. Z materiału tego wykonano próbki do mimośrodowego rozciągania (typu CT) i trójpunktowego zginania zgodnie z wyszczególnionymi już normami [1, 5]. Celem nadania materiałowi próbek, z pewnym przybliżeniem, własności materiału gotowych łańcuchów, poddano je zabiegom cieplnym i przeróbce plastycznej analogicznym, jakim podlegają kęsy i walcówka w toku dalszych faz procesów produkcyjnych [1, 5].

Istotną cechą cięgien górniczych pracujących przy zmiennych obciążeniach dynamicznych jest ich trwałość, związana między innymi z odpornością na pękanie materiału, z którego je wykonano. Za miarę tej trwałości w mechanice pękania przyjmuje się prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego.

Celem określenia trwałości górniczych cięgien łańcuchowych dokonano pomiarów prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w temperaturze pokojowej na próbkach typu CT. Badania przeprowadzono na systemie MTS, wykorzystując detektor pęknięć [8], który zapewnia automatyczne określenie efektywnej długości pęknięcia w funkcji podatności próbki.

Wyniki badań kalibrowania detektora pęknięć, określenia charakterystyk prędkości propagacji szczeliny zmęczeniowej  $da/dN$  występujących w postaci współczynników  $C$  i  $m$  we wzorze Parisa:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

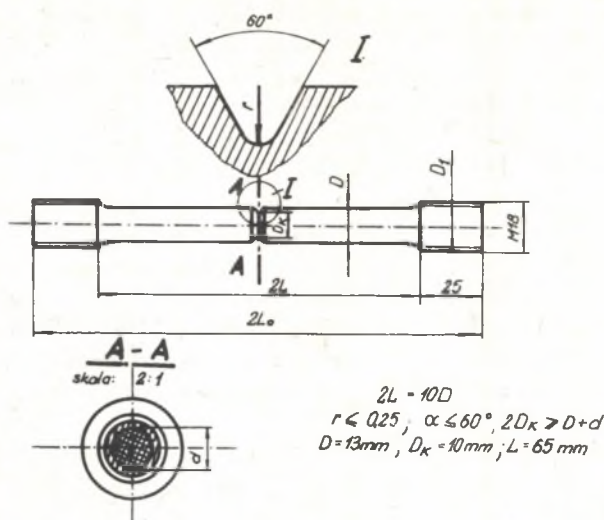
gdzie:

$\Delta K$  - podwójna amplituda zmiany intensywności naprężenia,

dla różnych rodzajów widma obciążenia początkowego ujęto tabelarycznie i zobrazowano wykresami w pracy [1].

Próbki do doświadczalnego wyznaczania współczynników  $K_{IC}$ ,  $\delta_c$  lub całki  $J_c$ , wykonane zgodnie z odpowiednimi normami, dla badanego materiału G25HGNM posiadają znaczne wymiary (rys. 1). Uniemożliwia to, jak już wspomniano, wykonanie próbek klasycznych z materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów, a więc z walcówki. Z tych względów w pracach IIM [1, 6] przyjęto jedną z metod badania odporności na pękanie na próbkach mniejszych, proponowanych w literaturze specjalistycznej [7] polegającą na rozciąganiu próbek cylindrycznych z karbem pierścieniowym, w dniu którego wytworzono szczelinę zmęczeniową (rys. 2). W czasie rozciągania próbki okrągłej wystąpi lokalny płaski stan odkształcenia wzdłuż całego konturu pierścieniowej szczeliny zmęczeniowej, co jest zgodne z wymaganiami liniowo-sprężystej mechaniki pękania.

Próbki takie są proste do wykonania z materiału przygotowanego do bezpośredniej produkcji łańcuchów górniczych, tzn. walcówki oraz stwarzają



Rys. 2. Próbką okrągłą do wyznaczania  $K_{Ic}$  przy rozciąganiu

możliwość szybkiego i łatwego określenia współczynnika  $K_{Ic}^{(o)}$  będącego odpowiednikiem odporności na pęknięcie  $K_{Ic}$ .

Celem ustalenia zależności pomiędzy  $K_{Ic}^{(o)}$  i  $K_{Ic}$  przeprowadzono badania porównawcze na dwóch seriach próbek. Pierwsza seria próbek wykonana była ze stali G25HGNM w postaci walcówki  $\varnothing 18$  mm, druga z tej samej stali lecz będącej w postaci kęsów  $100 \times 100$  mm, z których już wykonano próbki klasyczne i wyznaczano współczynniki  $K_{Ic}$  i  $\delta_c$ .

Odpowiednimi zabiegami cieplnymi obie serie próbek sprowadzono pod względem strukturalnym do jednakowego stanu początkowego.

Na podstawie wyników badań określono różnicę pomiędzy średnimi wartościami badanych współczynników, która dla stali G25HGNM wynosi:

$$\frac{K_{Ic}^{(o)} - K_{Ic} \text{ \u015b r}}{K_{Ic} \text{ \u015b r}} \approx 38\% \quad (2)$$

Pomimo różnic w wartościach tych współczynników metodyka określania  $K_{Ic}^{(o)}$  na próbkach okrągłych nie traci dużego praktycznego znaczenia w określaniu odporności na pęknięcie materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów. Z przeprowadzonych badań wynika bowiem, że  $K_{Ic}^{(o)}$  jest czułym wskaźnikiem na wszelkie zmiany parametrów procesów metalurgicznych, przeróbki plastycznej, ulepszenia cieplnego i różnorodnych wad materiałowych, analogicznie jak  $K_{Ic}$ . Oprócz tego znając wartość  $K_{Ic}^{(o)}$  z równania (2) można określić  $K_{Ic}$  z zależności:

$$K_{Ic} = \eta K_{Ic}^{(0)}, \quad \text{gdzie} \quad \eta = \frac{K_{Ic} \sigma_f}{K_{Ic}^{(0)} \sigma_f} \quad (3)$$

Szczegółowy opis przebiegów badań i obliczeń ujęto w pracach [1, 8].

#### Badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli

Badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli, które w przypadku materiału na górnicze ciągną łańcuchowe uzasadnione są charakterem ich obciążeń, o czym wspomniano we wprowadzeniu, przeprowadzono na systemie serwohydraulicznym firmy MTS, przy stałym zakresie odkształcenia całkowitego -  $\Delta \varepsilon_c$ . Z zarejestrowanych pętli histerezy w układzie siła-odkształcenie całkowite wyznaczono zakresy odkształcenia sprężystego -  $\Delta \varepsilon_s$  i plastycznego -  $\Delta \varepsilon_{pl}$  oraz odpowiadający im zakres naprężenia -  $\Delta \sigma$ , dokonując pomiarów sił maksymalnych i minimalnych w poszczególnych cyklach. Otrzymane wyniki posłużyły do sporządzenia wykresów cyklicznego odkształcenia dla próbek bez odkształceń wstępnych oraz wstępnie odkształconych (rys. 3). Przedstawiając wykreślnie zależność pomiędzy wartościami zakresu odkształceń plastycznych i sprężystych odczytanych dla cyklu odpowiadającego jednej drugiej liczby cykli do zniszczenia ( $1/2 N_f$ ), otrzymano wykresy trwałości zmęczeniowej. Przykładową krzywą zmęczeniową dla próbek nieodkształconych przedstawiono na rysunku 4. Przebieg krzywych zmęczeniowych opisano stosując wzór Mansona-Coffina:

$$\Delta \varepsilon_c = \Delta \varepsilon_{pl} + \Delta \varepsilon_s = M N_f^z + \frac{\sigma}{E} N_f^\psi \quad (4)$$

gdzie:

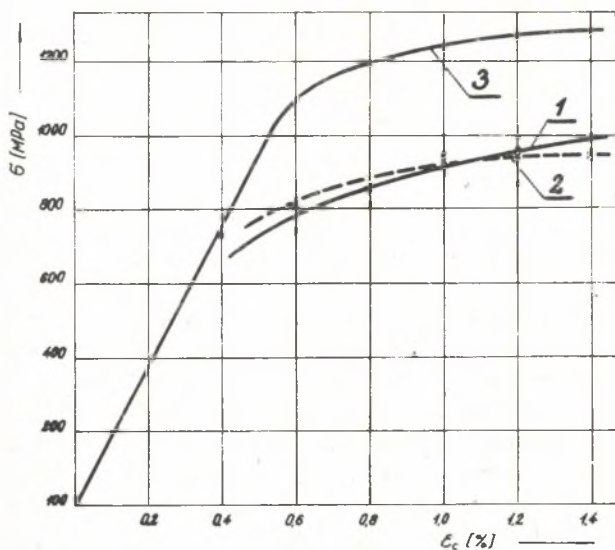
$M$  i  $G/E$  - stałe, określające położenie linii odkształcenia plastycznego i sprężystego na osi odkształceń przy  $N_f = 1$ ,

$z$  i  $\psi$  - współczynniki pochylenia.

Linie obrazujące odkształcenia plastyczne i sprężyste (rys.4) opisano równaniami prostych regresji.

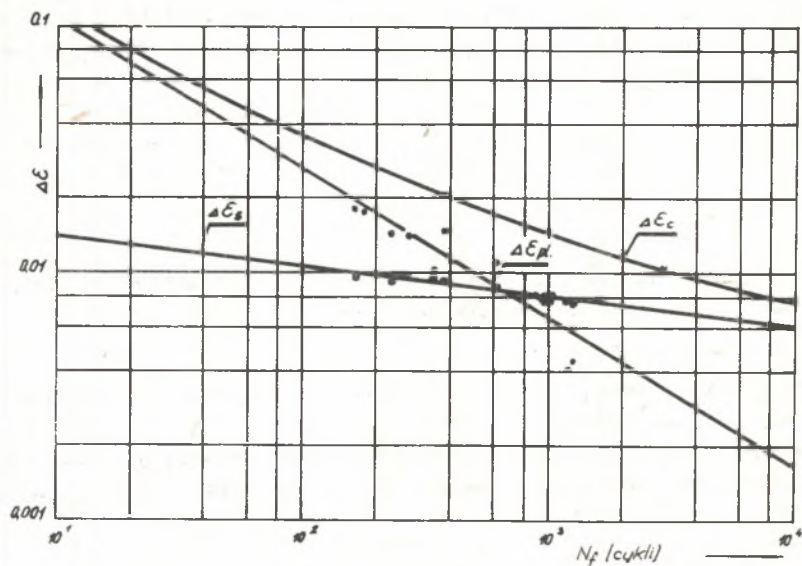
Następnie wyznaczono współczynniki charakteryzujące zdolność do cyklicznego umacniania badanego materiału, przyjmując krzywą cyklicznego umocnienia opisaną zależnością:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K \left( \frac{\varepsilon_{pl}}{2} \right)^{n'} \quad (5)$$



Rys. 3. Krzywe cyklicznego odkształcenia

1 - dla próbek bez odkształceń wstępnych, 2 - dla próbek odkształconych,  
3 - krzywa statycznego rozciągania dla stali G25HGNM



Rys. 4. Krzywe zmęczenia dla próbek nieodkształconych

gdzie:

$n'$  - wykładnik cyklicznego umocnienia,

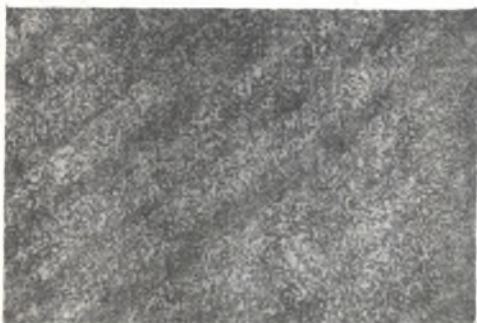
$K'$  - tzw. współczynnik wytrzymałości cyklicznej.

Szczegółowy sposób przeprowadzenia badań oraz obliczenia i ich wyniki ujęto w pracy [1].

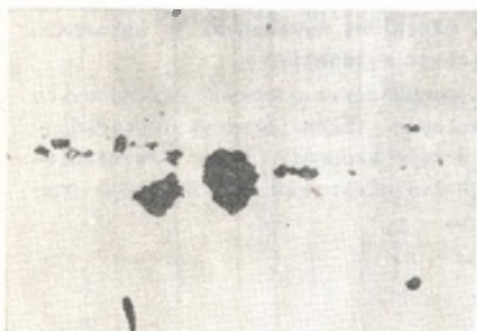
#### Wpływ struktury i wad materiałowych na trwałość górniczych ciągów łańcuchowych

Problem produkcji górniczych ciągów łańcuchowych o wysokiej granicy plastyczności i wytrzymałości przy równoczesnej dużej odporności na pękanie jest zagadnieniem złożonym, gdyż na jakość łańcucha wpływa proces technologiczny materiału, a więc skład procentowy, sposób wytopu, zalewania, walcowania, jak również proces technologiczny łańcucha, np. zgrzewanie, obróbka cieplna i kalibrowanie.

W wyniku badań przeprowadzonych w IIM [9, 10, 11, 12] ustalono, że jedną z głównych przyczyn często występujących nieodpowiednich własności mechanicznych, małej odporności na zmęczenie i kruche pękanie jest przede wszystkim niejednorodność strukturalna (rys. 5), występowanie licznych wtrąceń (rys. 6) oraz wady powstałe po przeróbce plastycznej (rys. 7).



Rys. 5. Struktura ogniwa łańcucha pow. 100x



Rys. 6. Wtrącenia niemetaliczne, zgląd wzdłuż włókien pow. 500x



Rys. 7. Powierzchnia walcówki  
pow. 50x

Praca ta zakończona są wnioskami dotyczącymi poprawy jakości materiału o podwyższonej wytrzymałości na łańcuchy, a w szczególności zaś stanu jego powierzchni. Przeprowadzona analiza teoretyczna i eksperymentalna może mieć zastosowanie nie tylko w przypadku materiału na łańcuchowe ciągnia górnicze, lecz również przy produkcji materiałów na inne elementy.

#### Podsumowanie

Z uwagi na stosowane obecnie na łańcuchowe ciągnia górnicze materiały o podwyższonej wytrzymałości należy określić ich odporność na kruche pękanie, wyznaczając jeden z wybranych parametrów  $K_{Ic}$ ,  $\delta_c$  lub całkę  $J_c$ . Wyznaczone wartości są czułymi wskaźnikami wszelkich zmian parametrów procesów metalurgicznych, przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej oraz zezwalają na ilościowe ujęcie wpływu tych parametrów oraz parametrów struktury na odporność na pękanie.

Wyznaczone wartości  $K_{Ic}$  oraz parametry charakteryzujące prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego umożliwiają określenie trwałości górniczych ciągnów przy założonym poziomie naprężeń i znanej długości początkowej szczelin istniejących w materiale równej średniej wielkości zanieczyszczeń i wtrąceń.

Wykazano, że trudne do wykonania znormalizowane próbki do wyznaczenia wskaźnika  $K_{Ic}$  można zastąpić próbkami okrągłymi wykonanymi z materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów w postaci walcówki.

Z uwagi na to, że charakterystyki mechaniczne gotowych łańcuchowych ciągnów górniczych są zbliżone do idealnych charakterystyk materiałów sprężysto-plastycznych, konieczne jest przeprowadzenie badań zmęczeniowych przy naprężeniach zbliżonych do granicy plastyczności, tzn. badań zmęczeniowych w zakresie małej liczby cykli.



## LITERATURA

- [1] Warchoł A.: Badania wpływu odkształceń trwałych na wytrzymałość ogniwo-  
wych łańcuchów górniczych ze stali G25HGNM. Rozprawa doktorska, Bi-  
blioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice 1982.
- [2] Antoniuk J., Suchoń J.: Wytrzymałość zmęczeniowa łańcuchów górni-  
czych. Przegląd Mechaniczny nr 22, Warszawa 1971.
- [3] Mikuła S.: Badania możliwości polepszenia trwałości zmęczeniowej gór-  
niczych ciągów łańcuchowych. Rozprawa doktorska, Biblioteka Pol. Śl.,  
Gliwice 1976.
- [4] Gołaski L., Frydman S.: Analiza sposobu inicjacji i propagacji zło-  
mu plastycznego w stalach pod kątem odporności stali na pękanie. Rap-  
ort Serii Sprawozdań Nr 37 (w ramach Problemu MR I-22), Instytut Ma-  
teriałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Pol. Wrocławskiej, Wrocław  
1979.
- [5] Warchoł A., Kwaśnicki A.: Ocena odporności na pękanie stali G25HGNM  
przeznaczonej do produkcji łańcuchów górniczych klasy jakości C.  
Wyd. NOT "SIGMA", Inżynieria Materiałowa nr 4 (11), Warszawa 1983.
- [6] Lamber T., Warchoł A.: Porównawcze badania odporności na pękanie ma-  
teriału w postaci walcówki przeznaczonego do produkcji łańcuchów gór-  
niczych. ZN Pol. Śl., s. Górnictwo nr 123, Gliwice 1983.
- [7] Panasiuk W.W., Kowczik S.E.: Primenienije cylindriczeskogo obrazca z  
kolcowoj treszczinoy dla opriedielenija charakteristik treszczino-  
stojkosti konstrukcyjnykh materialow. Procznost materialow i kon-  
strukcji. Naukowa Dumka, Kijew 1975.
- [8] Renowicz D.: Badania prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w  
temperaturach podwyższonych przy wykorzystaniu parametrów zmęczenia  
krótkotrwałego stali 10H2M. Praca doktorska, Biblioteka Pol. Śl., Gli-  
wice 1982.
- [9] Praca zbiorowa (Lamber T., Kwaśnicki A., Warchoł A. i inni): Badania  
nad doborem nowych materiałów na łańcuchy górnicze o wysokiej wytrzy-  
małości. NB-367/250/RM2/8/73 Instytut Inżynierii Materiałowej Pol.  
Śl., Katowice 1973.
- [10] Praca zbiorowa (Lamber T., Kwaśnicki A., Warchoł A. i inni): Badania  
dotyczące rozwiązania zasadniczych problemów produkcji łańcuchów  
górniczych ogniwo-nych najwyższej klasy. NB-310/241/RM2/12/74, Insty-  
tut Inżynierii Materiałowej Pol. Śl., Katowice 1974.
- [11] Praca zbiorowa (Lamber T., Kwaśnicki A., Warchoł A. i inni): Zagad-  
nienia podwyższenia wytrzymałości zmęczeniowej łańcuchów ogniwo-  
wych górniczych z punktu widzenia struktury. NB-366/RM-7/75 Instytut  
Inżynierii Materiałowej Pol. Śl., Katowice 1975.
- [12] Praca zbiorowa (Lamber T., Kwaśnicki A., Warchoł A. i inni): Badania  
dotyczące niejednorodności własności materiałów wyjęciowych, jak rów-  
nież gotowych ogniwo-nych łańcuchów górniczych. NB-223/RM2/76, Insty-  
tut Inżynierii Materiałowej Pol. Śl., Katowice 1976.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Antoniuk

## ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГОРНЫХ ТЯГОВЫХ ЦЕПЕЙ

## Резюме

В работе показана возможность применения методов линейной механики трещин для оценки сопротивления на трещины материалов с повышенной прочностью, предназначенных для производства тяговых устройств в горном деле. Для определения параметров, определяющих сопротивляемость на трещины, измерены опытные образцы с кольцевой нарезкой, которые можно легко выполнить из материала предназначенного для производства цепей. На примере стали G25HGMM в виде болванки размером  $\square 100 \times 100$  мм, экспериментально получена зависимость между параметрами полученными с применением двух различных опытных образцов.

В связи с выступающими перегрузками горных тяговых цепей во время эксплуатации, для оценки долговечности приняты исследования по усталостности в диапазоне небольшого количества циклов. Исследования эти хорошо отражают действительный процесс нагрузок в объекте.

ESTIMATION OF CRACKING RESISTANCE  
OF MATERIALS USED FOR MINING CHAINS

## Summary

Methods of linear cracking mechanics are proposed to estimate cracking resistance of increased strength materials used for production of mining chains. Normalized test bars difficult to carry out have been substituted by circular bars with ring notch which is easy to obtain from the material used for chains. As an example relations between parameters for steel G25HGMM in the form of billets  $\square 100 \times 100$  mm and bars  $\phi 18$  mm are experimentally found using two kinds of test bars. The estimation of life based on fatigue tests in the range of small number of cycles which are good approximations of real load in the plant.