

Tadeusz LAMBER
Andrzej WARCHOŁ

PORÓWNAWCZE BADANIA ODPORNOSCI NA PĘKANIE MATERIAŁU
W POSTACI WALCÓWKI PRZEZNACZONEGO DO PRODUKCJI ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodykę określenia odporności na pękanie (K_{Ic}) dla stali G25HGNM przeznaczonej do produkcji łańcuchów górniczych na podstawie rozciąganie próbek okrągłych z karbem pierścieniowym. Wymiary próbki zapewniły w czasie jej rozciągania realizację lokalnego płaskiego stanu odkształcenia wzdłuż całego konturu dna pierścieniowego karbu. Odpowiada to obliczeniowemu modelowi w mechanice pękania.

Metoda ta może stanowić prosty eksperymentalny sposób oceny wpływu różnorodnych parametrów procesów metalurgicznych, obróbki cieplnej i przeróbki plastycznej na odporność na pękanie materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów górniczych, dostarczanego w postaci prętów okrągłych.

Wprowadzenie

Łańcuchy górnicze są powszechnie stosowane jako układy ciągnowe w górniczych maszynach urabiających i transportowych. W celu zwiększenia trwałości i niezawodności łańcuchów górniczych w ostatnich latach produkuje się je ze stali o podwyższonej wytrzymałości. Dla tego typu materiału, odznaczającego się korzystnym zespołem własności wytrzymałościowych i plastycznych, szczególnego znaczenia nabiera zagadnienie przechodzenia ich w stan kruchy, charakteryzujący się podatnością do nagłego pęknięcia bez uprzedniego makroodkształcenia plastycznego. Występowanie tego zjawiska jest uwarunkowane oddziaływaniem wielu czynników związanych ze składem chemicznym i strukturą materiału oraz charakterem działających nań obciążeń. W związku z tym przy badaniu własności mechanicznych stali z mikrododatkami stopowymi o podwyższonej granicy plastyczności, stosowanej do wyrobu łańcuchów górniczych, należy między innymi zwrócić szczególną uwagę na jej odporność na pękanie.

W mechanice pękanie, w której jednym z problemów jest analiza odporności na pękanie, podstawowym badaniem doświadczalnym jest wyznaczenia wartości współczynników K_{Ic} , δ_c lub całki J_c na próbkach o wymiarach i kształtach określonych odpowiednimi normami i zaleceniami. Próbki te posiadają dość skomplikowane kształty, a minimalne ich wymiary, mające zapewnić wytworzenie w czasie badań płaskiego stanu odkształcenia w obszarze dna karbu, mogą być znaczne. Celem określenia odporności na pękanie

materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów górniczych, a więc walcówki, której wymiary uniemożliwiają stosowanie próbek klasycznych, należy przyjąć jedną z metod [1, 2, 3], polegającą na przeprowadzeniu badań doświadczalnych na próbkach o mniejszych rozmiarach.

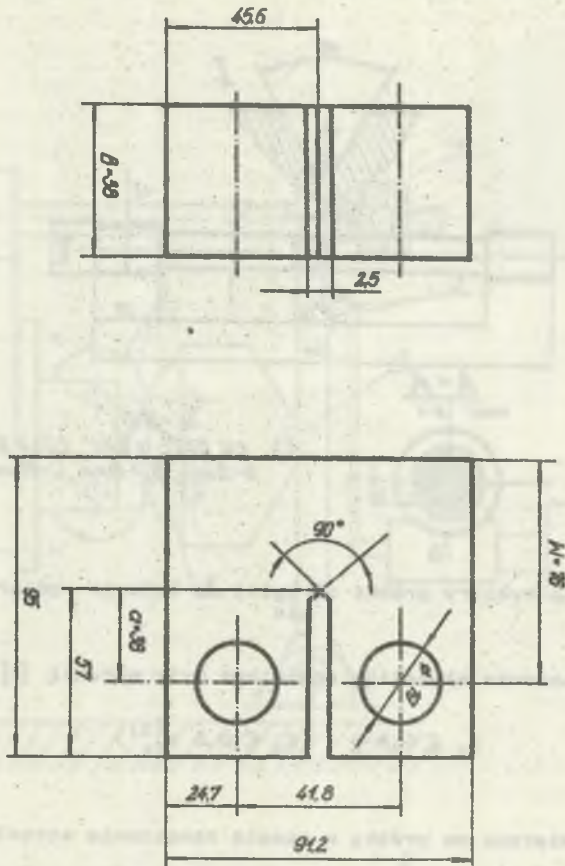
W pracy zastosowano metodę polegającą na rozciąganiu cylindrycznych próbek z kerbem pierścieniowym, w dnie którego wytworzono szczelinę złączeniową.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest przeprowadzenie porównawczych badań eksperymentalnych odporności na pękanie K_{IC} dla stali o podwyższonej wytrzymałości G25HGNM, przeznaczonej do produkcji łańcuchów górniczych, na próbkach o kształtach i wymiarach określonych ogólnie przyjętą normę ASTM oraz analogicznej wielkości $K_{IC}^{(o)}$ na próbkach okrągłych z kerbem pierścieniowym, możliwych do wykonania z walcówki Φ 18 mm z tej samej stali. W czasie rozciągania próbki okrągłej wystąpi lokalny płaski stan odkształcenia wzdłuż całego konturu szczeliny wytworzonej w dnie pierścieniowego karbu. Odpowiada to obliczeniowemu modelowi, stosowanemu w mechanice pękania [3]. Za stosowaniem przyjętej w danym przypadku próbki okrągłej przemawiają takie względy, jak: stosunkowo proste ich wykonanie i to z materiału w stanie przygotowanym do bezpośredniej produkcji łańcuchów górniczych oraz możliwość szybkiego i łatwego doświadczalnego pośredniego określenia odporności na pękanie K_{IC} .

Przebieg badań i ich wyniki

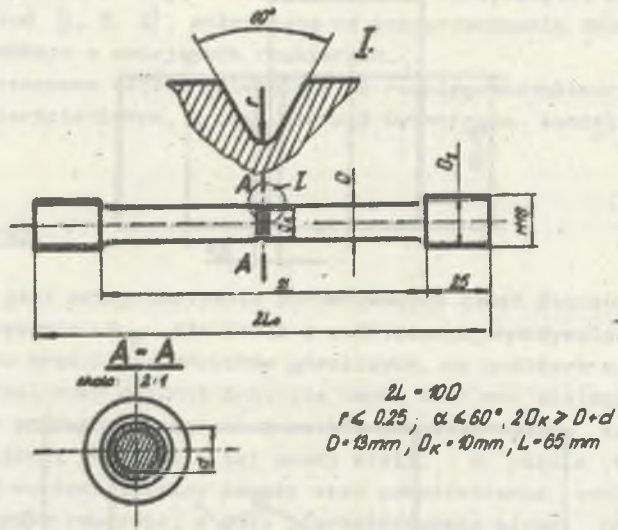
Do badań przygotowano dwie serie próbek okrągłych. Materiał pierwszej serii stanowiły pręty walcowane (walcówka Φ 18 mm) ze stali G25HGNM, z których bezpośrednio po cięciu formuje się ogniwa. Drugą serię, w celu porównania, wykonano z tej samej stali, lecz będącej w postaci kęsa ϕ 100 x x 100 mm, tj. z materiału znajdującego się w fazie przejściowej przeróbki plastycznej, a dla którego przeprowadzono już badania odporności na pękanie wyznaczając współczynnik K_{IC} [1, 4] na próbkach znormalizowanych (rys. 1). Kształt i wymiary zastosowanych próbek okrągłych przedstawiono na rysunku 2. Wszystkie próbki poddano procesowi ulepszania cieplnego o parametrach zgodnych ze stosowanymi w produkcji łańcuchów górniczych. Hartowanie prowadzono z temperatury 870°C w wodzie o temperaturze 70°C, a następnie odpuszczanie w temperaturze 400°C w czasie trzech godzin. Z kolei szlifowano część pomiarową próbek i w połowie jej długości nacinano kerb o wymiarach jak na rys. 2. Następnym etapem przygotowania tego typu próbek było wytworzenie w dnie naciętego karbu pierścieniowego pęknięcia złączeniowego.



Rys. 1. Wymiary próbki znormalizowanej do badania odporności na pękanie

Szczelinę zmęczeniową nanoszono metodą trójpunktowego obrotowego zginania. W tym celu zaprojektowano i wykonano stanowisko, którego schemat pokazano na rys. 3. Ruch obrotowy nadawano próbce silnikiem (8) połączonym z nią sprzęgłem elastycznym. Próbka (1) swoimi końcami opierała się na układzie łożysk tocznych (2), a w części środkowej była obciążana za pośrednictwem dźwigni (3). Do regulacji obciążenia służyła nakrętka (4). Siłę wywieraną na próbkę mierzono za pomocą układu złożonego z tensometrów oporowych (5), naklejonych na dźwignię (3), połączonych z mostkiem tensometrycznym (6), odczytując jej wartość na woltomierzu cyfrowym (7) po uprzednim wycechowaniu układu.

W wyniku trójpunktowego obrotowego zginania w próbce generuje się centryczne pęknięcia zmęczeniowe. Pomiaru głębokości wzrastającego pęknięcia zmęczeniowego dokonywano na podstawie zmiany podatności próbki powodującej spadek siły dociskającej.



Rys. 2. Kształt i wymiary próbki okrągłej do badania odporności na pęknięcie

W czasie nanoszenia szczeliny spełnione były warunki [2]:

$$Q_f \leq 0,6 Q \quad (K_f \leq 0,6 K_{IC}^{(0)}) \quad (1)$$

gdzie:

Q_f - siła wywierana na próbkę w czasie nanoszenia szczeliny zmęczeniowej.

K_f - intensywność naprężeń w czasie generowania pęknięcia zmęczeniowego.

Q - siła wyznaczona ze wzoru:

$$Q = 0,5908 \frac{R_{0,2} D_K^3 \gamma_0(\epsilon)}{L(1 + \epsilon_K)^2} \quad (2)$$

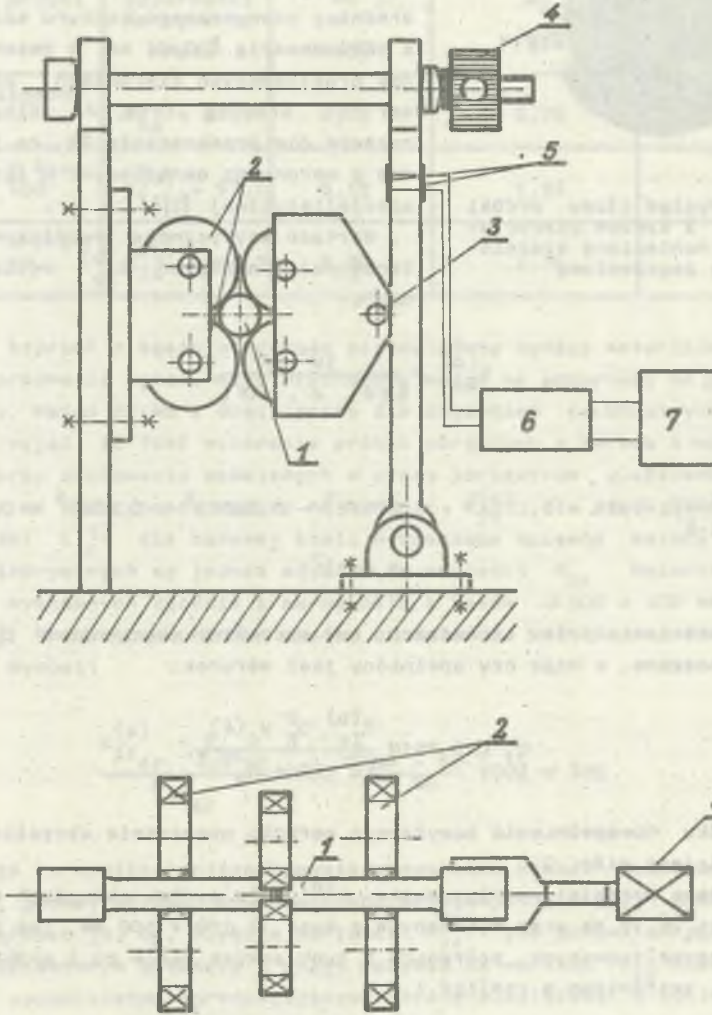
gdzie:

$$\gamma_0(\epsilon) = \frac{\sqrt{\epsilon} \sqrt{\epsilon^{-1} - 0,8012}}{\sqrt{1 - \epsilon}} \quad (2a)$$

$$\epsilon = \frac{d}{D}, \quad \epsilon_K = \frac{d}{D_K}, \quad 0 < \epsilon < 1 \quad (2b)$$

gdzie:

L - wymiar jak na rys. 2.



Rys. 3. Schemat stanowiska do nanoszenia szczeliny zmęczeniowej w dnie karbu próbki okrągłej



Rys. 4. Wygląd złomu próbki okrągłej z karbem pierścieniowym i naniesioną szczeliną zmęczeniową

Próbki z naniesioną szczeliną zmęczeniową rozciągano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej UPD 20, rejestrując siłę zrywającą F . Po rozerwaniu zmierzono średnicę zewnętrznego konturu szczeliny d z dokładnością $\pm 0,01$ mm w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, obliczając wartość średnią (rys. 4). Elipsowatość rdzenia nie przekraczała 2%, co jest zgodne z warunkami określonymi w literaturze specjalistycznej [2].

Wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń $K_{IC}^{(o)}$ wyliczono ze wzoru:

$$K_{IC}^{(o)} = \frac{\sqrt{2} \cdot F}{\sqrt{\pi} d \cdot d \cdot f(\varepsilon)}, \quad (3)$$

gdzie:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon}} (1 - 0,5\varepsilon - 0,125\varepsilon^2 + 0,2757\varepsilon^3 - 0,2082\varepsilon^4 + 0,066\varepsilon^5 + 0,0048\varepsilon^6 - 0,013\varepsilon^7) \quad (3a)$$

Po zakończeniu próby sprawdzano, czy szczelina zmęczeniowa była właściwie nanoszona, a więc czy spełniony jest warunek:

$$Q_f \leq 0,7519 \frac{K_{IC}^{(o)} D_K^3 y_o(\varepsilon)}{\sqrt{d} L (1 + \varepsilon_K^{-1})^2}. \quad (4)$$

W przypadku niespełnienia powyższego warunku nanoszenie szczeliny prowadzono mniejszą siłą Q_f .

Otrzymane wartości współczynnika $K_{IC}^{(o)}$ dla próbek okrągłych pobranych z walcówki ϕ 18 mm oraz wykonanych z kęsa ϕ 100 x 100 mm, jak i K_{IC} dla próbek znormalizowanych, pobranych z tych samych kęsów co i próbki okrągłe [1, 4] zestawiono w tablicy 1.

Analiza wyników badań

Uzyskane wartości średnie współczynnika $K_{IC}^{(o)}$ z badań na próbkach okrągłych z karbem pierścieniowym wykonanych z walcówki ϕ 18 mm oraz na identycznych próbkach wykonanych z kęsa ϕ 100 x 100 mm wykazały niewielkie różnice. W pierwszym przypadku wynosiła ona $97 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, w drugim $94 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Świadczy to o tym, że ostatnie zabiegi procesu przeróbki plastycznej,

Tablica 1

Wyniki badań odporności na pękanie dla stali G25HGNM

Rodzaj próbki	Wartość średnia odporności na pękanie MPa \sqrt{m}	Odchylenie standardowe s MPa \sqrt{m}	Błąd standardowy średniej $\sigma_{\bar{x}}$ MPa \sqrt{m}	Współczynnik zmienności W _s %
Znormalizowane ASTM	$K_{IC} = 67,9$	6,73	2,75	9,90
Okrągła z kęsa $\phi 100 \times 100$	$K_{IC}^{(o)} = 97,2$	6,12	1,93	6,29
Okrągła z przeta $\phi 18$ mm	$K_{IC}^{(o)} = 94,7$	5,55	1,76	5,87

w wyniku których z kęsów otrzymuje się walcówkę będącą materiałem wyjściowym do formowania ogniw, mają nieznaczny wpływ na odporność na pękanie tego materiału. Można zatem z dostateczną dla zagadnień technicznych dokładnością przyjąć, że fakt wykonania próbek okrągłych z kęsem z walcówki czy z kęsa, przy zachowaniu omawianych w pracy parametrów ulepszenia cieplnego, nie ma praktycznie wpływu na wartość $K_{IC}^{(o)}$ dla stali G25HGNM.

Wartości $K_{IC}^{(o)}$ dla badanej stali wyznaczone opisaną metodą na próbkach cylindrycznych są jednak większe od wartości K_{IC} wyznaczonych na próbkach wykonanych zgodnie z normą ASTM z kęsów $\phi 100 \times 100$ mm (tablica 1) [1, 4]. Procentowa różnica między otrzymanymi wartościami średnimi K_{IC} i $K_{IC}^{(o)}$ wynosi:

$$\frac{K_{IC}^{(o)} - K_{IC}}{K_{IC}} 100\% = \frac{94 - 68}{68} 100\% \approx 38\% \quad (5)$$

Różnica ta wynika z niezachowania wszystkich zasad podobieństwa fizycznego, geometrycznego oraz warunków brzegowych pomiędzy obydwoimi rodzajami próbek [5, 6]. Większe wartości $K_{IC}^{(o)}$ dla próbek okrągłych z kęsem pierścieniowym świadczą o dużym wpływie na wartość K_{IC} niezachowanie warunków podobieństwa ograniczających strefę plastyczną w takim stopniu, jak to ma miejsce w próbkach znormalizowanych. Uwidoczni się to wyraźnie w przypadku materiałów o dużym zapasie plastyczności, jakim jest materiał G25HGNM.

Sumaryczny wpływ na różnice w wartościach $K_{IC}^{(o)}$ i K_{IC} , wynikające z niezachowania kryteriów podobieństwa w badaniach zastępczych, można określić stosunkiem obu wyznaczonych wartości średnich, który dla badanego gatunku stali G25HGNM przy określonych parametrach ulepszenia cieplnego i przeróbki plastycznej wynosił:

$$\varphi = \frac{K_{IC}^{(o)}_{gr}}{K_{IC}^{(o)}_{sr}} = \frac{68}{94} = 0,71. \quad (6)$$

Uwagi końcowe

Pomimo różnic w wartościach K_{IC} , uzyskanych na próbkach znormalizowanych i okrągłych z karbem pierścieniowym, metoda określenia $K_{IC}^{(o)}$ na próbkach okrągłych z karbem nie traci swojej aktualności i dużego praktycznego znaczenia w określaniu odporności na pękanie materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów górniczych w postaci walcówki. Z przeprowadzonych badań [1] wynika bowiem, że $K_{IC}^{(o)}$ wyznaczone na próbkach okrągłych z karbem jest czułym wskaźnikiem na wszelkie zmiany parametrów procesów metalurgicznych przeróbki plastycznej (np. odkształceń trwałych [4]), ulepszenia cieplnego i różnorodnych wad materiałowych, analogicznie jak K_{IC} określone na próbkach znormalizowanych. We wszystkich wyszczególnionych przypadkach obie wartości dla stali G25HGNM różniły się prawie stale o tę samą wartość. Odporność na pękanie $K_{IC}^{(o)}$ wyznaczona na próbkach okrągłych z karbem może zatem stanowić podstawę do łatwego i prostego sposobu jakościowej oceny wpływu wyszczególnionych parametrów na odporność na pękanie materiału wyjściowego do produkcji łańcuchów górniczych w postaci walcówki. Wyznaczony współczynnik φ byłby potrzebny tylko dla ilościowego ujęcia wpływu poszczególnych parametrów na odporność na pękanie, a w szczególności przy określaniu trwałości (liczby cykli obciążeń do zniszczenia) elementu konstrukcyjnego, w danym przypadku łańcucha górniczego, wykonanego z badanego materiału przy znanych długościach początkowych szczelin w postaci różnorodnych wad materiałowych [1]. Potrzebny bowiem wówczas do tego rodzaju obliczeń współczynnik K_{IC} można określić pośrednio z zależności (6), $K_{IC} = \varphi K_{IC}^{(o)}$.

LITERATURA

- [1] Warchoź A.: Badanie wpływu odkształceń trwałych na wytrzymałość znapężeniową ogniowych łańcuchów górniczych ze stali G25HGNM, Rozprawa Doktorska 1982, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej.
- [2] Panasiuk W.W., Kowczyk S.E., Nagirnyj L.W.: K woprosu o metodach opriedielenija soprotiwlenija materiała razprastranienij treszcziny, Metody eksperymentalnych issledowanij. Fiziko-miechaniczieskiej Institut AN USSR, Lwow 1976.
- [3] Panasiuk W.W., Andrejkin A.E.: K teoriji opriedielenija kriticzeskiego razkrytija treszcziny, Miechanika dieformirujemych tiał i konstrukcji - Zbornik statiej, Moskwa, Meezinostrojenije, 1975.
- [4] Warchoź A., Kwaśnicki A.: Badania odporności na pękanie stali G25HGNM przeznaczonej do produkcji łańcuchów górniczych klasy jakości C, Inżynieria Materiałowa nr 4/82, Wydawnictwo "SIGMA", Warszawa 1982.

- [5] Iwanowa N.S.: K opriedieleniju wiazkosti razruezenija metalłow i spławow w usłowjach podobia lokalnogo razruezenija, Fizyko-chimiczeskaja mechanika matieriałow, nr 5/1977, AN USSR Kijów, 1977.
- [6] Kewal K. Mehta: Vergleichende Sprodbbruchuntersuchungen an den Kettenstählen 20NiCrMo2 (SAE 8620), SAE 4620, 23MnNiCrMo52 und 23MnNiCrMo64, Thyssen Edelst., Techn. Ber. 4 Band 1978 Heft 1.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy ANTONIAK

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1983 r.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦА В ВИДЕ ПРОКАТКИ ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ НА ЦЕПИ ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Резюме

В статье представлено метод испытания стойкости (K_{IC}) стали марки G25HGNM предназначенной для производства горных цепей на основе растяжения круглых образцов с внешней кольцевой нарезкой. Размеры образца обеспечивают реализацию плоского поля деформации по контуру дна кольцевой нарезки. Это соответствует расчётной модели механики разрушения.

Метод можно считать простым экспериментальным способом оценки влияния параметров металлургического процесса, термической и пластической обработки на стойкость исходного материала на цепи поставляемого в виде круглых стержней.

COMPARATIVE EXAMINATION OF A FRACTURE TOUGHNESS OF BLANK USED IN PRODUCTION OF MINING CHAINS

Summary

The paper presents the method of describing fracture toughness (K_{IC}) for G25HGNM steel used for the production of mining chains, on the basis of cylindrical specimens with ring notch. The dimensions assured formation of local plane strain during the test along the contour of ring notch. It corresponds with a calculation model in the fracture mechanics. The method can be regarded as a simple, experimental way of estimating the influence of different parameters of metalurgical process, heat treatment and plastic working on fracture toughness of the basic material for the production of mining chains provided in the form of cylindrical shape rods.