

O PEWNYM MECHANIZMIE ODDZIAŁYWANIA OLEJU NA PRĘDKOŚĆ PĘKANIA W STALI

ON SOME MECHANISM OF OIL INFLUENCE ON THE CRACK VELOCITY OF STEEL

W artykule przedstawiono opracowanie wyników badania prędkości pęknięcia stali 45 w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego. Podano równania opisujące prędkość pęknięcia. Przeprowadzono analizę przyczyn zmniejszenia prędkości pęknięcia przez środowisko oleju. Opisano mechanizm oddziaływania oleju na prędkość wzrostu pęknięcia.

Słowa kluczowe: prędkość pęknięcia, mechanika pęknięcia, otoczenie

In this article an elaboration of results of carbon steel 45 crack velocity research in air and paraffin oil environment were presented. Crack velocity equations were given. An analysis of crack velocity decrease reasons by oil environment was conducted. A mechanism of oil influence on crack extension velocity was described.

Keywords: crack velocity, fracture mechanics, environment

1. Wstęp

Zarówno wyniki eksperymentów, jak i obserwacje powierzchni przelomów elementów konstrukcji i mechanizmów, które uległy zniszczeniu wskazują, że ich awarie nie występowały w sposób nagły. Uszkodzenie o dominującej długości początkowej a_0 znajdujące się w takim elemencie, pod wpływem zewnętrznych obciążeń zmiennych powiększało swój wymiar do wielkości a_c zwanej krytyczną i dopiero wówczas następowała dekohezja. Wzrost długości pęknięcia jest efektem oddziaływania wielu czynników między innymi: naprężenia σ , własności materiału C , asymetrii cyklu $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ i warunków środowiskowych. Zależy on w znacznym stopniu od amplitudy naprężeń $2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \Delta\sigma$ działających na konstrukcję. Bowiem o propagacji pęknięcia decyduje lokalność zmian na jego czole. Ta związana jest z polem naprężeń w strefie pęknięcia o intensywności wyrażonej współczynnikiem K .

Wzory opisujące prędkość wzrostu zmęczeniowego pęknięcia powstały w wyniku prowadzonych eksperymentów. Istniejące w literaturze równania wzrostu pęknięcia, zostały opracowane głównie dla obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie i wiążą prędkość wzrostu pęknięcia da na cykl dN z długością pęknięcia a oraz przyłożonym naprężeniem σ i parametrami materiału.

Spośród zależności tego typu najczęściej używa się równania zaproponowanego przez Parisa i Erdogana:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.1)$$

1. Introduction

Both the experimental results and observations of fracture surfaces of structure elements and mechanisms that were destroyed indicate that the breakdowns did not occur suddenly. Damage of the largest initial length a_0 in such an increased its size to a_c , called the critical length, due to external variable loads, and only then decohesion occurred. Increase of fracture length is the result of influence of many factors, including: stress σ , material properties C , cycle asymmetry $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ and environmental conditions. It largely depends on amplitude of stress $2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \Delta\sigma$ influencing the construction. Because the locality of changes on the fracture face surface decide upon its propagation. And this is connected to stress field in the fracture area with the intensity described by coefficient K .

The formulas describing the increase of fatigue fracture velocity were developed as a result of the conducted experiments. The fracture increase equations found in the existing literature were developed mainly for cyclical loads with a fixed amplitude and connect the fracture increase velocity da per cycle dN with the fracture length a and applied stress σ and material parameters.

Amongst dependences of this type the one used most often is the equation proposed by Paris and Erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.1)$$

gdzie: $\Delta K = K_{max} - K_{min} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} - \sigma_{min} \sqrt{\pi a} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$
 dla $R \geq 0$ (w przypadku $R < 0$ czyli $\sigma_{min} < 0$, $K_{min} = 0$ [7]),
 K_{max} , K_{min} – maksymalna i minimalna wartość współ-
 czynnika intensywności naprężeń odpowiadająca
 maksymalnemu σ_{max} i minimalnemu σ_{min} naprężeniu
 cyklu, C, m – stałe.

Istotny wpływ na prędkość pęknięcia wywiera asy-
 metria cyklu wyrażona współczynnikiem $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$.
 W praktyce spośród wielu równań uwzględniających
 wpływ asymetrii cyklu, najczęściej posługujemy się
 równaniem Formana, które jest rozszerzonym zapisem
 wzoru (1.1).

Znajomość prędkości pęknięcia pozwala na uzy-
 skanie informacji o liczbie cykli zmian obciążenia
 (czasie) do osiągnięcia przez pęknięcie wartości kry-
 tycznej a_c lub określonej wymogami kontrolnymi.

2. Wpływ czynników środowiskowych na wzrost pęk- nięcia zmęczeniowego

Przebieg procesu zmęczeniowego zależy w istotny
 sposób od czynników środowiskowych. Środowiska
 różne od otoczenia laboratoryjnego wpływają istotnie
 na prędkość pęknięcia stosownie do ich własności,
 a zwłaszcza wrażliwości materiału na działanie środo-
 wiska. Omawiany wpływ wyraźnie maleje w zakresie
 wysokich ΔK . Nakładanie się zjawiska adsorpcji, dy-
 fuzji i korozji na zjawiska zmęczeniowe powoduje,
 że przebieg zmęczenia staje się bardzo złożony. Stąd
 podejmowano próby wyznaczenia prędkości pęknięcia
 w aktywnych środowiskach za pomocą wyrażań dwu-
 członowych lub wielocłonowych [5], w których do
 prędkości pęknięcia w zwykłych warunkach dodawano
 człon lub człony ujmujące wpływ tych środowisk.
 Prędkość pęknięcia w otoczeniu innym niż środowisko
 laboratoryjne jest najczęściej jednak opisywana rów-
 naniem (1.1) bez dodatkowych uzupełnień.

Wzrost pęknięcia w elemencie konstrukcyjnym
 poddanym obrotowemu zginaniu, w otoczeniu cie-
 czy obojętnej – niewywołującej efektów korozji np.
 oleju parafinowego, postępuje w czasie fazy działa-
 nia naprężeń rozciągających. Wówczas czoło pęknięcia
 przesuwa się powoli naprzód, w wyniku działania me-
 chanizmu podobnego do mechanizmu plastycznego
 niszczenia przy obciążeniu stałym. W tym czasie
 przestrzeń jego zapelnia się olejem. Wzrost pęknięcia
 zatrzymuje się wskutek plastycznego odkształcenia,
 a naprężenie wywołane przez spiętrzenie dyslokacji
 przed frontem pęknięcia przeszkadza w jego roz-
 przestrzenianiu. Podczas półcyklu ściskania ostrze
 pęknięcia dąży do zamknięcia. Spiętrzenia dyslokacji
 zanikają, jednak powierzchnie pęknięcia nie zbliżają
 się do siebie w takim stopniu, jak to ma miejsce bez
 obecności oleju. Przeszkodą jest warstewka oleju.

where: $\Delta K = K_{max} - K_{min} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} - \sigma_{min} \sqrt{\pi a} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$
 for $R \geq 0$ (in case $R < 0$ i.e. $\sigma_{min} < 0$, $K_{min} = 0$ [7]), K_{max} ,
 K_{min} – maximum and minimum stress intensity co-
 efficient value corresponding to maximum σ_{max} and
 minimum σ_{min} cycle stress, C, m – fixed.

Cycle asymmetry expressed with the $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$
 coefficient has a significant influence on crack veloci-
 ty. From many equations taking the cycle asymmetry
 into consideration the one used most in practice is
 the Forman equation, which is an extended form of
 formula (1.1).

Knowing the crack velocity allows obtaining
 information concerning the number of cycles of load
 changes (time) until the fracture reached the critical
 value a_c or value specified by control requirements.

2. Influence of environmental factors on fatigue fracture increase

The course of fatigue process significantly depends
 on environmental factors. Environments different than
 a laboratory environment significantly influence the
 crack velocity adequately to their properties, especial-
 ly the sensitivity of material to environmental factors.
 The discussed influence noticeably decreases in the
 range of high ΔK . The adsorption, diffusion and cor-
 rosion effects together with fatigue effects make the
 fatigue course very complex. This is why attempts
 were made to determine the crack velocity in active
 environments using dyadic or polyadic expressions
 [5], in which term or terms describing the influence of
 these environments were added to the crack velocity.
 Crack velocity in environment other than laboratory
 environment is most often described with equation
 (1.1) without additional supplements.

Fracture increase in the construction element sub-
 ject to rotational bending in a neutral fluid environ-
 ment – not causing corrosion, paraffin oil for example,
 progresses in the phase of tensile stress effects. At that
 time the fracture face slowly moves forward, which
 results in a mechanism similar to the mechanism of
 plastic destruction under constant load. During this
 time the fracture space fills with fluid. The fracture
 increase stops due to plastic deformation and the stress
 caused by dislocation concentration in front of the
 fracture obstructs its spreading. During compression
 half-cycle the fracture edge tends to close. Dislocation
 concentrations decay, however the fracture surfaces do
 not move close as to each other as in case of oil-free
 environment. The oil layer is an obstacle.

Problem of the influence of lubricant environments
 on fatigue crack velocity propagation in steel was ex-
 amined by many researchers. Endo and colleagues [6]
 researching the influence of paraffin oil and silicone

Problem oddziaływania środowisk smarnych na prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych w stali podejmowało wielu badaczy. Endo i współpracownicy [6] badając wpływ oleju parafinowego i silikonowego na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych w próbkach stalowych gładkich i z karbem, stwierdzili zmniejszenie prędkości. Podobnie Schäffer [9] badając prędkość zmęczeniowego pęknięcia w stali C15 w środowisku oleju parafinowego i silikonowego stwierdza, że oleje wpłynęły na zmniejszenie prędkości pęknięcia.

W literaturze krajowej początkowo twierdzono, że środowiska powierzchniowo aktywne (do których należy zaliczyć oleje) wywołują zwiększenie prędkości pęknięcia. Następnie pogląd ten jednak zmieniono [8] podając, że w środowisku oleju silikonowego nie zaobserwowano żadnego wpływu na prędkość pęknięcia w stali o zawartości 0,036 %C. W badaniach [1] uzyskano znaczne zmniejszenie prędkości pęknięcia w stali 45 w otoczeniu oleju parafinowego. Nieznaczne zmniejszenie prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w stali 45 pod wpływem środowiska oleju Hipol stwierdzono w pracy [4]. W pracach tych nie przedstawiono, lecz podano tylko w sposób ogólny mechanizm oddziaływania oleju na prędkość propagacji pęknięcia. Mała liczba przeprowadzonych eksperymentów nad zbadaniem i wyjaśnieniem mechanizmu oddziaływania oleju na prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego w stalach, oraz znaczna rola środowisk olejów smarnych w maszynach i urządzeniach, wydaje się przesądzać o randze problemu i skłania do zajęcia się nim.

3. Wyniki badań własnych i ich opracowanie

Obiektem badań była stal 45 ($R_e = 581 \text{ MN/m}^2$, $R_m = 773,8 \text{ MN/m}^2$) – tworzywo konstrukcyjne powszechnie stosowane na wały. Bezpośrednie pomiary prędkości pęknięcia prowadzono przy zginaniu obrotowym (50 Hz) na próbkach wspornikowych, metodą zabarwienia powierzchni pęknięcia po określonej liczbie cykli zmęczeniowych. Następnie po pęknięciu próbki wielkość ta mierzona była na mikroskopie stereoskopowym. Próbki badano w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego o lepkości kinematycznej ν i gęstości ρ podanych w tabeli 1.

Badania prowadzono przy amplitudzie naprężenia $\sigma_a = 323,73 \text{ MN/m}^2$. Stanowi to około 56% granicy plastyczności. W czasie eksperymentu kontrolowano zmiany temperatury oleju w którym znajdowała się próbka.

oil on fatigue fracture increase velocity in smooth and notched steel samples stated a decrease of this velocity. Similarly, Schäffer [9] researching the velocity of fatigue crack in C 15 steel in paraffin oil and silicone oil environment states that the oils influenced the decrease of crack velocity.

In Polish literature it was initially stated that surface active environments (which include oils) result in increased crack velocity. However, this opinion was changed [8] stating that in paraffin oil environment no influence on the crack velocity of steel with 0.036 % C content. The tests [1] showed a significant decrease of crack velocity of steel 45 in paraffin oil environment. A small decrease of fatigue fracture propagation velocity in steel 45 under the influence of Hipol oil environment was stated in paper [4]. These works did not describe the specifics of the mechanism of influence of oil on fracture propagation velocity only present it in a general way. The small number of conducted experiments researching the mechanism of oil influence on the fatigue fracture propagation velocity in steels, and significant role of the lubricant oil environments in machines and equipment seems to decide on the problem magnitude and inclines toward paying closer attention to it.

3. Results of own tests and their elaboration

The subject of the tests was steel 45 ($R_e = 581 \text{ MN/m}^2$, $R_m = 773,8 \text{ MN/m}^2$) – construction material often used for shafts. Direct measurements of the crack velocity were conducted at rotational bending (50 Hz) on bracket samples, using the method of coloring fracture surface after a given number of cycles. Then, after the cracking of the sample this value was measured using stereoscope microscope. Samples were tested in environments of air and paraffin oil with kinetic viscosity ν and density ρ specified in table 1.

The tests were conducted at stress amplitude of $\sigma_a = 323,73 \text{ MN/m}^2$. This constitutes approximately 56% of the yield point. During the experiment the temperature of oil in which the sample was placed was controlled. An approximately constant increase of temperature of samples tested in oil and in air.

Tabela 1

Olej parafinowy Paraffin oil	ν (20° C) m^2/s	ν (50° C) m^2/s	ρ kg/m^3
	$245,7 \times 10^{-6}$	$42,3 \times 10^{-6}$	881

Utrzymywano jednakowy w przybliżeniu przyrost temperatury próbek badanych w oleju i powietrzu.

Wyniki serii pomiarów przedstawiono w formie wykresu $a=f(N)$, który wraz z dokładnym opisem eksperymentu zamieszczono w pracy [1]. Na wykresie tym nachylenie linii $a=f(N)$ w środowisku oleju parafinowego jest znacznie mniejsze, w porównaniu z linią reprezentującą wyniki badań prędkości pęknięcia w otoczeniu powietrza. Oznacza to, że prędkość wzrostu pęknięcia w otoczeniu oleju jest mniejsza jak w powietrzu.

Dane z wykresu $a=f(N)$ posłużyły do budowy wykresu prędkości pęknięcia $da/dN=f(\Delta K)$, który przedstawiono na rys. 1. Zależności $da/dN=f(\Delta K)$ odnośnie wyników badań w otoczeniu powietrza i oleju wykazują na wykresie pewien rozrzut. Mając na uwadze zwiększoną pewność w szacowaniu trwałości zmęczeniowej, która zależy od prędkości pęknięcia [2], do dalszego opracowania wyników przyjęto większe wartości prędkości. Zgodnie z powyższym do obliczenia wartości parametrów C i m , przyjęto prędkości leżące na górnych liniach ograniczających wyniki pomiarów prędkości pęknięcia.

Graficznym obrazem równania Parisa w układzie podwójnie logarytmicznym jest linia prosta. Po logarytmowaniu wzoru (1.1) otrzymamy wyrażenie postaci

$$\log da/dN = \log C + m \log \Delta K,$$

któremu odpowiada równanie linii prostej $y=b+ax$, gdzie: $y = \log da/dN$, $b = \log C$, $a = m$, $x = \log \Delta K$.

Przyjmując z wykresu (rys.1) współrzędne dwóch wyników propagacji pęknięcia w otoczeniu powietrza: $da/dN = 1 \times 10^{-8}$ m/cykl, $\Delta K = 12,83$ MPa \cdot m^{1/2} oraz $da/dN = 1,66 \times 10^{-8}$ m/cykl, $\Delta K = 16,23$ MPa m^{1/2}, otrzymano równanie opisujące prędkość wzrostu pęknięcia w stali 45 w otoczeniu powietrza

$$da/dN = 4,04 \cdot 10^{-11} \Delta K^{2,16} \text{ m/cykl} \quad (3.1)$$

W celu opisanego prędkości pęknięcia stali w otoczeniu oleju przyjęto z wykresu $da/dN=f(\Delta K)$ dwie prędkości: $da/dN = 5,90 \times 10^{-9}$ m/cykl i $da/dN = 9,23 \times 10^{-9}$ m/cykl, których ΔK (druga współrzędna) wynosi odpowiednio: $\Delta K = 17,21$ MPa m^{1/2} oraz $\Delta K = 22,22$ MPa m^{1/2}. Na tej podstawie obliczono stałe równania:

$$C = 4,06 \cdot 10^{-11} \frac{\text{metr}}{(\text{MPa} \cdot \text{metr}^{1/2})^m \text{ cykl}} \text{ oraz } m = 1,75.$$

The results of the series of measurements are presented in the form of a graph $a=f(N)$, which was placed in work [1] together with detailed description of the experiment. On this graph the inclination of line $a=f(N)$ in paraffin oil environment is significantly lesser compared to the line representing the fracture increase in air environment. This means that the fracture increase velocity in oil environment is smaller than in air environment.

The data from graph $a=f(N)$ were used to build the crack velocity graph $da/dN=f(\Delta K)$, shown on figure 1. The $da/dN=f(\Delta K)$ dependencies related to results of tests in air and oil environments show a certain dispersion on the graph. Bearing in mind the increased reliability in estimating fatigue life, which depends on crack velocity [2], higher velocity values were assumed for the following tests. According to the above velocity located on the upper limits of crack velocity measurement results were taken for calculating C and m parameters.

A straight line is a graphic presentation of Paris equation in a double logarithmic system. After finding the logarithm of formula (1.1) we receive an expression in the form of $\log da/dN = \log C + m \log \Delta K$, which corresponds to the straight line equation $y=b+ax$, where: $y = \log da/dN$, $b = \log C$, $a = m$, $x = \log \Delta K$.

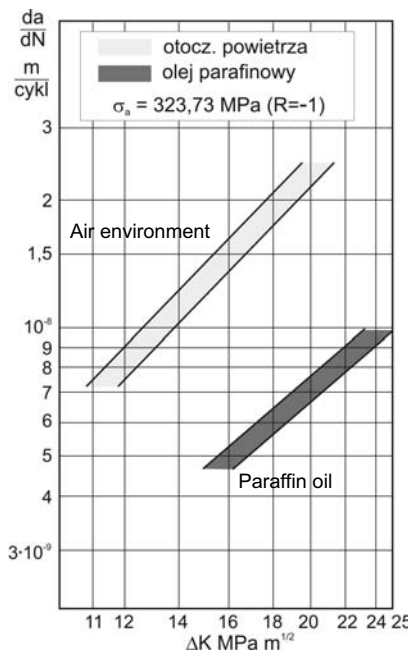
Taking the coordinates of two results of fracture propagation in air environment from (figure 1): $da/dN = 1 \times 10^{-8}$ m/cycle, $\Delta K = 12,83$ MPa \cdot m^{1/2} and $da/dN = 1,66 \times 10^{-8}$ m/cycle, $\Delta K = 16,23$ MPa m^{1/2}, we obtained the equation describing the velocity of steel 45 fracture increase in air environment

$$da/dN = 4,04 \cdot 10^{-11} \Delta K^{2,16} \text{ m/cycle} \quad (3.1)$$

In order to describe the steel crack velocity in oil environment two velocities: $da/dN = 5,90 \times 10^{-9}$ m/cycle and $da/dN = 9,23 \times 10^{-9}$ m/cycle, the ΔK (second coordinate) of which equals: $\Delta K = 17,21$ MPa m^{1/2} and $\Delta K = 22,22$ MPa m^{1/2} correspondingly were taken from graph $da/dN=f(\Delta K)$. Using this as a basis the constants of equation:

$$C = 4,06 \cdot 10^{-11} \frac{\text{metr}}{(\text{MPa} \cdot \text{metr}^{1/2})^m \text{ cykl}} \text{ oraz } m = 1,75$$

were calculated.



Rys.1. Prędkość pęknięcia w stali 45 zginanej obrotowo w otoczeniu powietrza i oleju parafinowego
Rys.1. The crack velocity of steel 45 bent rotationally in air and paraffin oil environment

Równanie opisujące prędkość wzrostu pęknięcia w stali 45 w otoczeniu oleju parafinowego ma postać

$$da/dN = 4,06 \cdot 10^{-11} \Delta K^{1,75} \text{ m/cykl} \quad (3.2)$$

Porównując prędkość pęknięcia stali 45 badanej w otoczeniu oleju parafinowego oraz powietrza (rys.1) dla tych samych wartości zakresu współczynnika intensywności naprężeń np. $\Delta K=18,14 \text{ MPa m}^{1/2}$, obserwuje się, że prędkość pęknięcia w środowisku oleju ($6,47 \times 10^{-9} \text{ m/cykl}$) stanowi około $\frac{1}{3}$ prędkości pęknięcia w otoczeniu powietrza ($2,11 \times 10^{-8} \text{ m/cykl}$). Poszukując przyczyn tego zjawiska, należy odnieść się do wielkości mających istotny wpływ na propagację pęknięcia zmęczeniowego. Jak wynika ze wzoru (1.1) pozostaje ona w ścisłym związku z polem naprężeń w pobliżu wierzchołka pęknięcia, którego intensywność, stosując metody liniowej mechaniki pęknięcia, można wyrazić współczynnikiem K , a ściślej jego zakresem ΔK . Należy sądzić, że przyczyną mniejszych wartości prędkości pęknięcia jest wielkość współczynnika intensywności naprężeń. Z porównania wartości prędkości pęknięcia w obu środowiskach wynika, że wzrost pęknięcia w stali w otoczeniu oleju parafinowego następuje podobnie jak w otoczeniu powietrza, lecz przy mniejszej wartości ΔK . Korzystając z równania (3.1) opisującego prędkość pęknięcia w otoczeniu powietrza, obliczono wartości ΔK , przy których zachodzą odczytane wielkości da/dN w otoczeniu oleju:

$$\Delta K = 2,16 \sqrt{\frac{(da/dN)_{(i)} \text{ w oleju}}{4,04 \cdot 10^{-11}}} \quad (3.3)$$

Tak wyznaczone wartości ΔK (np. $10,49 \text{ MP} \cdot \text{m}^{1/2}$) są znacząco mniejsze od wartości obliczonych dla cyklu wahadłowego ($18,14 \text{ MPa m}^{1/2}$). Stanowią one około 58% tych ostatnich.

Wzrost długości pęknięcia związany jest (przez ΔK) z wielkością amplitudy naprężeń $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$. Wartość $\Delta \sigma$, dla rozpatrywanych prędkości (da/dN) w oleju wyznaczono na podstawie obliczonych wielkości ΔK oraz znanych z wykresu $a=f(N)$ długości pęknięcia a . Zakres wartości różnicy naprężeń ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$) dla przyjętego przedziału ($5,67 \times 10^{-9} \div 9,23 \times 10^{-9}$) m/cykl prędkości pęknięcia w otoczeniu oleju zmienia się od $189,69 \text{ MPa}$ przy długości pęknięcia $a=8,6 \times 10^{-4} \text{ m}$ do wielkości $180,05 \text{ MPa}$, kiedy długość pęknięcia osiągnęła wymiar $a=15 \times 10^{-4} \text{ m}$. Średnia wartość zakresu zmian naprężeń wynosi $\Delta \sigma = 186,08 \text{ MPa}$. Jest to wartość znacznie mniejsza w porównaniu z wielkością $\Delta \sigma = \sigma_{max} = 23,73 \text{ MPa}$, która jest właściwą dla cyklu wahadłowego.

The equation describing the velocity of fracture increase in steel 45 in paraffin oil environment has the following form:

$$da/dN = 4,06 \cdot 10^{-11} \Delta K^{1,75} \text{ m/cycle} \quad (3.2)$$

Comparing the crack velocity of steel 45 tested in paraffin oil and air environments (figure 1) for the same values of stress intensity coefficient range, for example $\Delta K=18,14 \text{ MPa m}^{1/2}$, one can observe that the crack velocity in oil environment ($6.47 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$) constitutes approximately $\frac{1}{3}$ of the crack velocity in air environment ($2.11 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$). When looking for the root cause of this effect one must bear in mind the values that have significant influence of fatigue fracture propagation. As it results from formula (1.1) its stays in close relation with stress field near the fracture top, the intensity of which, using linear fracture mechanics methods, can be expressed with coefficient K or more strictly speaking – its range ΔK . One could suppose that the root cause of lower values of crack velocities is the magnitude of stress intensity coefficient. By comparing the values of crack velocities in both environments we can see that the fracture increase in steel in paraffin oil environment progresses similarly like in the case of air environment, but at a lower ΔK value. Using equation (3.1) describing the crack velocity in air environment the values of ΔK , at which the recorded da/dN values occur in oil environment were calculated:

$$\Delta K = 2,16 \sqrt{\frac{(da/dN)_{(i)} \text{ in oil}}{4,04 \cdot 10^{-11}}} \quad (3.3)$$

The ΔK determined in such a way (for example $10,49 \text{ MP} \cdot \text{m}^{1/2}$) are significantly lower than values calculated for the oscillating cycle ($18.14 \text{ MPa m}^{1/2}$). They constitute approximately 58% of the latter.

The increase of fracture length is related (through ΔK) with the value of stress amplitude $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$. The $\Delta \sigma$ value for the examined velocities (da/dN) in oil were determined on the basis of calculated ΔK values and fracture lengths a known from graph $a=f(N)$. Range of values of stress differences ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$) for the taken interval ($5.67 \times 10^{-9} \div 9,23 \times 10^{-9}$) m/cycle of crack velocities in oil environment changes from 189.69 MPa at fracture length of $a=8.6 \times 10^{-4} \text{ m}$ to 180.05 MPa , when the fracture length reaches $a=15 \times 10^{-4} \text{ m}$. Average value of stress changes range is $\Delta \sigma = 186.08 \text{ MPa}$. This is a value significantly lower in comparison with $\Delta \sigma = \sigma_{max} = 23.73 \text{ MPa}$, which is the value for the oscillating cycle.

4. Prawdopodobny mechanizm oddziaływania oleju na prędkość propagacji pęknięcia

Znaczna różnica w prędkości propagacji pęknięcia w stali 45 występująca w otoczeniu powietrza laboratoryjnego i oleju parafinowego, spowodowana jest zakresem zmian naprężeń zewnętrznych $\Delta\sigma$, jakie oddziałują na badany element w wymienionych środowiskach. W przypadku eksperymentu prowadzonego w otoczeniu powietrza ($R=-1$) $\Delta\sigma=\sigma_{max}=323,73$ MPa zaś $\sigma_{min}=0$, w środowisku oleju $\Delta\sigma=186,08$ MPa. Naprężenie maksymalne nie ulega zmianie. Dowodzi to, że w otoczeniu oleju następuje zmiana naprężenia minimalnego σ_{min} , które wzrasta od wartości $\sigma_{min}=0$ do wartości $\sigma_{min}=\sigma_{max}-\Delta\sigma=323,73-186,08=137,65$ MPa. Można, więc przyjąć, że element zawierający pęknięcie powierzchniowe poddany w otoczeniu oleju zewnętrznemu obciążeniu o przebiegu obustronnym symetrycznym ($R=-1$), w wyniku oddziaływania oleju wnikałego do przestrzeni pęknięcia, podlega obciążeniu w cyklu, którego naprężenie minimalne $\sigma_{min}>0$.

Wzrost minimalnej wartości obciążenia σ_{min} , a tym samym i K_{min} , spowodowany jest oddziaływaniem oleju. W fazie działania na element naprężeń rozciągających, kiedy następuje wzrost pęknięcia, powierzchnie utworzone przez nie rozwierają się. W tym czasie olej jest zasysany do przestrzeni utworzonej przez rozchylające się powierzchnie. W półcyklu ściskania olej znajdujący się w pęknięciu jest ściskany. Następuje wyciskanie oleju. Wzrost ciśnienia wywołuje zwiększenie lepkości oleju, co wpływa na spowolnienie jego wypływu. Przyjmuje się, że siły bezwładności są pomijalnie małe, ze względu na wymiary warstewki oleju i nie mają udziału w jego wypływie [3]. Zbliżeniu się powierzchni pęknięcia przeszkadza część oleju, która nie została wyciśnięta. Olej ściskany przez zbliżające się do siebie powierzchnie penetruje ten obszar, prowadząc do zmniejszenia amplitudy naprężeń zewnętrznych $2\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$, wywołującej lokalne zmiany na czole pęknięcia, będące przyczyną jego wzrostu. Następuje zmniejszenie składowych:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\Theta) \quad (4.1)$$

poła naprężeń w pobliżu wierzchołka pęknięcia. Wynikiem tego jest spadek wartości naprężeń w strefie pęknięcia, w porównaniu do odpowiadających im wartości w otoczeniu powietrza. Znalazło to potwierdzenie we wstępnych obliczeniach numerycznych z użyciem metody elementów skończonych.

Efektom takiego działania oleju jest wytworzenie dodatnich naprężeń minimalnych cyklu $\sigma_{min}>0$, powodujących wzrost wartości minimalnej współczynnika intensywności naprężeń z $K_{min}=0$, dla $R=-1$, do war-

4. Probable mechanism of influence of oil on fracture propagation velocity

The significant difference in propagation velocity of fracture in steel 45 occurring in laboratory air environment and paraffin oil results from changes of external stress $\Delta\sigma$, that effect the given element in the specified environments. In case of the experiment conducted in air environment ($R=-1$) $\Delta\sigma=\sigma_{max}=323.73$ MPa and $\sigma_{min}=0$, in oil environment $\Delta\sigma=186.08$ MPa. Maximum stress is not changed. This proves that in oil environment the minimum stress σ_{min} changes and increases from $\sigma_{min}=0$ to $\sigma_{min}=\sigma_{max}-\Delta\sigma=323.73-186.08=137.65$ MPa. So one can assume that an element with a surface fracture subject to external load of bilateral symmetric course ($R=-1$) in oil environment, as a result of the influence of oil penetrating into the fracture space, is subject to a load in a cycle, the minimum stress of which is $\sigma_{min}>0$.

The increase of minimum load value σ_{min} and thus also K_{min} , is caused by oil influence. During the phase of tensile stress affecting the element, when the fracture increase takes place, the surfaces created by the fracture open up. In this time oil is sucked into the space created by the two opening surfaces. During the compression half-cycle the oil in the fracture is compressed. The oil is being squeezed out of the fracture. Pressure increase causes the oil viscosity to increase, which results os slowing down its outflow. It is assumed that forces of inertia are negligible small due to the dimensions of oil film and do not participate in the outflow [3]. The remaining oil, which was not squeezed out of the fracture, stops the fracture surfaces from contacting. The oil, compressed by surfaces drawing closer to each other, penetrates this area and reduces the amplitude of external stress $2\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$, resulting in local changes on the fracture face, which are the results of its increase. The components of stress field near the fracture tip:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\Theta) \quad (4.1)$$

are reduced. This results in a decrease of values of stress in the fracture area, compared to corresponding values in air environment. This was confirmed by initial numeric calculations using the finite elements method.

The result of such influence of oil is the creation of positive minimum cycle stress $\sigma_{min}>0$, resulting in the increase of minimum value of stress intensity coefficient from $K_{min}=0$, for $R=-1$, to $K_{min}=\sigma_{min}\sqrt{\pi a}>0$. This reduces the value of ΔK for $\Delta K=K_{max}-K_{min}$. The value of range of stress intensity coefficient ΔK created this way is smaller than $\Delta K=K_{max}$, which is specific for oscillating load of the element working in air environment.

tości $K_{min} = \sigma_{min} \sqrt{\pi a} > 0$. Wpływa to na zmniejszenie wartości ΔK do wielkości $\Delta K = K_{max} - K_{min}$. Tak powstała wartość zakresu współczynnika intensywności naprężeń ΔK jest mniejsza od $\Delta K = K_{max}$, która jest właściwa obciążeniu wahadłowemu elementu pracującemu w otoczeniu powietrza.

Rezultatem zmniejszenia ΔK jest, zgodnie z wzorem Parisa (1.1), mniejsza prędkość propagacji pęknięcia.

5. Podsumowanie

Część oleju, która nie została wyciśnięta z przestrzeni utworzonej przez powierzchnie pęknięcia, w czasie ich zwierania przez naprężenia ściskające cyklu, penetruje ją, wywołując zmniejszenie amplitudy naprężeń zewnętrznych $2\sigma_a = \Delta\sigma$. Powoduje to zwiększenie naprężeń minimalnych σ_{min} cyklu, które działają na element zawierający pęknięcie. Następuje wzrost wartości minimalnej współczynnika intensywności naprężeń K_{min} . W rezultacie zmniejsza się wielkość zakresu ΔK a tym samym maleje prędkość wzrostu pęknięcia.

Trwałość stalowych elementów maszyn i mechanizmów pracujących w środowiskach olejów smarnych, może być zwiększona przez dobór odpowiedniego oleju opóźniającego prędkość zmęczeniowego pęknięcia. Obok wymagań wynikających z funkcji smarnych olejów, należy przy ich doborze uwzględnić wpływ wywierany na trwałość, a tym samym i niezawodność elementów konstrukcji i mechanizmów.

6. References

- [1] Banaszek J.: *Wpływ oleju nieaktywnego na prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego w stali 45*, Folia Societatis Scientiarum Lublinensis, vol.23,177, Mat.-Fiz.-Chem.2,177,1981.
- [2] Banaszek J.: *Wpływ środowiska olejowego na własności zmęczeniowe stali*, Przegląd Mechaniczny 1,15,1980.
- [3] Barwell F.T.: *Łożyskowanie*, WNT Warszawa, 144,1984.
- [4] Bogdański S., Szymaniak M.: *Warunki penetracji płynu do wnętrza pęknięcia*, XXI Sympozjum Podstaw Konstrukcji Maszyn, Ustroń, Bielsko-Biała 2003,t.1, WNT 161,2003.
- [5] Crocker T.W., Leis B.N.: *Corrosion Fatigue: Mechanics, Metallurgy*, Electrochemistry and Engineering, STP-801, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1983.
- [6] Endo K., Komai K., Okada T., Kiyota M.: *Bull. ISME* 15,89,1316,1972.
- [7] Kocańda S., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. PWN Warszawa, 66,1997.
- [8] Kocańda S.: *Zmęczeniowe pękanie metali*, WNT Warszawa, 359,1985.
- [9] Schäffer A.: *The Effects of Noncorrosive Liquids of the Fatigue Behaviour of Steel*, Proc 5 th conf. on Dimension and Strength Calculat, and 6 th Congr. Mater. tesing. Budapest. Akad. Kiado, vol.2,1974.

The result of decreased ΔK is, according to Paris formula (1.1), the reduced speed of fracture propagation.

5. Summary

The part of oil, which was not squeezed out of the space created by fracture surfaces, during its closing due to cycle compressive stress, penetrates the fracture resulting in decreased amplitude of external stress $2\sigma_a = \Delta\sigma$. This results in increased minimum stress σ_{min} of the cycle, which effect the element with the fracture. The minimum value of stress intensity coefficient K_{min} increases. This results in decreased value of ΔK range and thus the fracture increase speed is reduced.

The durability of steel components of machines and mechanisms operating in lubricating oils environments can be increased by selecting appropriate oil, which reduces the fatigue cracking. Apart of requirements resulting from lubricating properties of greases, when selecting them, always consider their effect on durability and thus the reliability of elements of constructions and mechanisms.

Dr inż. Jan BANASZEK

Prof. dr hab. inż. Józef JONAK

Dr inż. Hubert DĘBSKI

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

e-mail: j.banaszek@pollub.pl, j.jonak@pollub.pl, h.debski@pollub.pl
