



## Wpływ dyspersji perlitu w stali węglowej na procesy zmęczenia

### *Influence of perlite dispersion of carbon steel on the fatigue*

(1) Igor Vakulenko<sup>1</sup>, (2) Anna Kawalek<sup>\*2</sup>, (3) Leonid Vakulenko<sup>3</sup>, (4) Svitlana Proydak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after V. Lazaryan, ul. Lazaryana 2, 49010 g. Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

<sup>3</sup> Management of the Dnieper railway, Pr .D. Jawornicko 108, 49000 g. Dnipro, Ukraine

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 9.04.2018

Recenzja: 26.04.2018

Akceptacja: 28.09.2018

#### Wkład autorów

- (1) Koncepcja, założenia, metody, nadzór merytoryczny
- (2) Badania gęstości dyslokacji, analiza wyników, przygotowanie publikacji
- (3) Badania zmęczenia, interpretacja wyników
- (4) Badanie mikrostruktury, analiza wyników

#### Streszczenie

W stali węglowej o strukturze perlitycznej charakterystyczny jest wpływ grubości płytek ferrytu w perlicie na rozwój procesów zmęczenia. Poza znaną zależnością wytrzymałości zmęczenia od dyspersji kolonii perlitycznych, stwierdzono także istnienie korelacji pomiędzy pojawieniem się zaburzeń w monotonicznym przebiegu krzywej zmęczenia. Z analizy przebiegów wykresów zmęczenia wynika, że jednocześnie ze spadkiem dyspersji perlitu występuje przesunięcie punktu pojawienia się odchylenia w obszarze granicznej wytrzymałości zmęczenia, a co za tym idzie, spadek amplitudy cyklu. Po przekształceniu zależności analitycznej, opisującej przebieg krzywej zmęczenia, otrzymano zależność współczynnika kątownego stycznej od jej położenia na określonym punkcie krzywej. Jeśli zwiększenie grubości płytek ferrytu w perlicie dla małej liczby cykli zmęczenia jest zależnością odwrotnie proporcjonalną, to dla dużej liczby cykli uzyskuje się określoną zależność z przeciwnym znakiem. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że wartość współczynnika kątownego stycznej może być wielkością charakterystyczną, co umożliwia wyznaczenie ograniczonej wytrzymałości zmęczenia w warunkach zróżnicowanego cyklicznego obciążania metalu.

**Słowa kluczowe:** stal węglowa, perlit, dyspersja, wytrzymałość zmęczenia, mikrostruktura

#### Article info

Received: 9.04.2018

Reviewed: 26.04.2018

Accepted: 28.09.2018

#### Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions, methodology, substantive supervision
- (2) Analysis and interpretation of results
- (3) Numerical simulation testing, interpretation of results

#### Abstract

An example of carbon steel with perlite structure is the character of the effect of thickness ferrite layer of perlite on the development of fatigue processes. In addition to the known dependence of the strength of fatigue on the dispersion of the perlite colony, in addition, a correlation connection was found between the appearance of violations on the monotonous course of the curve. An analysis of the appearance of the curves of fatigue determined that, when the perlite dispersion decreases simultaneously with the shift of the moment of occurrence of the anomaly in the region of increasing the limited endurance during fatigue, there is a decrease in the throw of magnitude amplitude of the cycle. After converting the analytic dependence, which determines the course of the fatigue curve, we obtained the relation for the angular coefficient of the tangent at a definite point of the curve. If for area of the low cycle fatigue an increase in the thickness of the ferrite layer of perlite is accompanied by an inversely proportional relation, then

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 34 325 07 84; e-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 34 325 07 84; e-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl

(4) Numerical simulation testing, interpretation of results

for regions with high cyclic fatigue, an opposite sign-dependence is obtained. On the basis of the analysis of obtained results, it was determined that the magnitude of the angular coefficient of the tangent can be proposed as a characteristic, which allows to estimate the resource of limited endurance under conditions of different degrees of cyclic overload of the metal.

**Keywords:** carbon steel, perlite, dispersion, fatigue endurance, microstructure

## 1. WPROWADZENIE

W oparciu o analizę wyników badań eksperymentalnych wybranej stali węglowej stwierdzono, że grubość płytek ferrytu w kolonii perlitu w znacznym stopniu wpływa nie tylko na wartość granicznej wytrzymałości zmęczeniowej, ale także na przebieg wykresu obciążeń cyklicznych [1]. Jednocześnie, biorąc pod uwagę istnienie określonego powiązania sieci krystalicznych ferrytu i cementytu przy wzroście kolonii perlitu, zmniejszenie grubości warstwy ferrytu wiąże się z odpowiednim zmniejszeniem grubości płytek cementytu. Biorąc pod uwagę dodatkowy wpływ składników strukturalnych na ogólną charakterystykę wytrzymałościową stali węglowej, należy oczekiwać występowania wpływu dyspersji płytek cementytu w warstwie perlitycznej na rozwój procesu zmęczeniowego tej stali.

Opisywany wpływ przyjmuje określoną wartość, szczególnie przy ocenie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej materiału na obciążenia cykliczne. Warunkowy podział krzywej zmęczeniowej na obszary o małej i dużej liczbie cykli zmęczeniowych jest spowodowany zmianami jakościowymi mechanizmu tworzenia się stref pękania metalu. Z tego względu występowanie określonej wrażliwości metalu na warunki obciążenia cyklicznego rzeczywiście wynika z istnienia zależności pomiędzy rozwojem procesów zmian strukturalnych na granicy przejścia pomiędzy danymi obszarami. Świadczy o tym występowanie zaburzeń w monotonicznym przebiegu krzywych zmęczeniowych.

## 1. INTRODUCTION

Based on the analysis of experimental studies of carbon steel it is determined that the ferrite layer thickness of the perlite colony to a large extent affects not only the level of fatigue endurance limits but also the appearance of the cyclic loading diagram itself [1]. At the same time, taking into account the existence of a certain conjugation of the crystal lattices of ferrite and cementite with the growth of the pearlite colony, the decrease in the ferrite layer will be accompanied by a corresponding thinning of the cementite plates. Taking into account the additive contribution of structural components to the overall level of strength characteristics of carbon steels, one should expect the effect of the dispersion cementitious plates of perlite on the development of fatigue phenomena.

The presented influence acquires the determined value, especially under conditions of evaluation of the limited endurance value of the metal material on the degree of cyclic over loading. Conditional distribution of the fatigue curve at the area of low- and high-cyclic fatigue is caused by the qualitative changes in the mechanism of forming the sites of metal destruction. On this basis the determined sensitivity of the metal material to the conditions of cyclic loading is in fact caused by the dependence of the development of structural transformation processes on the border of transition from one area to another. It is evidenced by existence of violation of the monotonous form of the fatigue curves.

## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano stal węglową stosowaną do wytwarzania kół pojazdów szynowych, która zawierała 0,62% C, 0,68% Mn i 0,49% Si. Poprzez przyspieszone chłodzenie w procesie izotermicznym, w czasie wystarczającym do zakończenia przemiany perlitycznej, uzyskano różną dyspersję perlitu. Pomiar grubości warstwy ferrytu w kolonii perlitu ( $\lambda$ ) wykonywano zgodnie z metodyką metalografii ilościowej. Zmiany  $\lambda$  mieściły się w przedziale 0,14–0,50  $\mu\text{m}$ . Pomiar gęstości dyslokacji ( $\rho_{211}$ ) wykonywano metodą interferencyjną (211), za pomocą rentgenografii strukturalnej. Do badań zmęczeniowych wykorzystano urządzenie Saturn-10. Pomiar realizowano przy temperaturze otoczenia, z wykorzystaniem płaskich próbek w symetrycznym cyklu zginania naprzemiennego. Częstotliwość obciążeń wynosiła 1000 cykli/min. Na podstawie analizy krzywej obciążeń cyklicznych w układzie współrzędnych amplituda cyklu – liczba cykli do pęknięcia próbki, określano wartość granicznej wytrzymałości zmęczeniowej, współczynnika kąтового stycznej w danym punkcie krzywej oraz miejsce graniczne pomiędzy małą i dużą liczbą cykli zmęczeniowych.

## 3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Na rys. 1 przedstawiono wpływ grubości warstwy ferrytu w strukturze perlitycznej na kształt krzywej dla obciążeń cyklicznych badanej stali węglowej. W zakresie badanych wartości  $\lambda$  cechą charakterystyczną krzywych obciążeń cyklicznych jest występowanie zakłócenia w monotonicznym spadku amplitudy cyklu ( $\sigma_a$ ) wraz z rosnącą liczbą cykli prowadzących do zniszczenia próbki. Te anomalie przebiegu krzywych zmęczeniowych są w literaturze często określane jako „punkty przerwania” [2]. W zależności od wewnętrznej struktury metalu oraz warunków obciążenia cyklicznego, anomalie przyjmują różne położenia na osi odciętych. Występujące ekstrema znacznie się różnią: od

## 2. MATERIAL AND METHODOLOGY OF RESEARCH

*The carbon steel of a rail way wheel containing 0.62% C; 0.68% Mn; 0.49% Si was used as a material for research. Different perlite dispersion was obtained using accelerated cooling of the metal to certain temperatures of isothermal holding, with the duration sufficient to complete the perlite transformation. The thickness evaluation of the ferrite layer of the perlite colony ( $\lambda$ ) was carried out according to the methodologies of quantitative metallographic. The change interval of  $\lambda$  was 0.14–0.5  $\mu\text{m}$ . The dislocations density ( $\rho_{211}$ ) was measured by the interference (211), using the methodology of X-ray structural analysis. Fatigue tests were carried out under conditions of the machine Saturn-10, at room temperature on the samples of flat shape with symmetrical cycle of alternating bending. Load frequency was 1000  $\text{min}^{-1}$ . Using the analysis of the constructed cyclic loading curve in the coordinates of the cycle amplitude – the number of cycles to fracture, it was determined the value of limited endurance, angular coefficient of the tangent for a certain curve point, position of the transition border from a low- to high-cyclic fatigue.*

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

*The Fig. 1 presents the influence of the ferrite layer thickness of perlite on the form of cyclic loading diagram for the investigated carbon steel. For the range of  $\lambda$  values under study, the characteristic feature of the cyclic loading curves is the occurrence of violation in the monotonous decrease in the cycle amplitude ( $\sigma_a$ ) on the number of cycles to the destruction of sample. In the literature the above-mentioned anomalies on the fatigue curves are often referred to as “break-points” [2]. Depending on the features of the internal structure of the metal, the conditions of cyclic loading, the position of such anomalies on the abscissa axis is changed. The appearance of extremums itself is significantly different: from*

dużych wahań amplitudy cyklu z koncentracją w wąskim zakresie cykli (rys. 1a) do wystąpienia niemal poziomego odcinka na krzywej zmęczeniowej (rys. 1e). Takie przebiegi dla zmiennych warunków obciążeń cyklicznych wynikają z łącznego oddziaływania różnych czynników. Według pracy [1] przyczyną anomalii jest zakłócenie jednorodności podczas rozwoju procesów transformacji strukturalnej przy obciążaniu cyklicznym, homogeniczność rozkładu odkształceń [2] lub zmiana aktywnych krystalograficznych systemów poślizgu dyslokacji [3].

Powszechnie tłumaczy się ten proces zmianą stanu naprężenia w metalu przed rozwojem pęknięcia zmęczeniowego. Przyjmuje się, że dla małej liczby cykli w obrębie pęknięcia występuje płaski stan naprężenia, a obszar przełomu zmęczeniowego na powierzchni pęknięcia jest stosunkowo niewielki.

Inne warunki rozwoju pęknięcia występują przy dużej liczbie cykli zmęczeniowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy powierzchni pęknięcia w tych obszarach stwierdzono pojawianie się charakterystycznych cech podczas przemieszczania się i opóźniania frontu tworzącego się pęknięcia, co świadczy o występowaniu wymuszonego, płaskiego stanu naprężenia. Wystąpienie na osi odciętych granicy pomiędzy obszarami o małej i dużej liczbie cykli zmęczeniowych ( $N_1$ ), dla badanego przedziału dyspersji kolonii perlitu, świadczy o występowaniu zależności od wartości  $\lambda$ . Po wykonaniu wykresu punktowego wartości  $N_1$ , w zależności od odpowiednich wartości  $\lambda$ , stwierdzono wyraźną, wprost proporcjonalną zależność między obydwooma wielkościami (rys. 2). Zgodnie z wykazaną zależnością, zwiększenie grubości warstwy perlitycznej wpływa na znaczne przesunięcie wartości  $N_1$  w kierunku rosnącej liczby cykli.

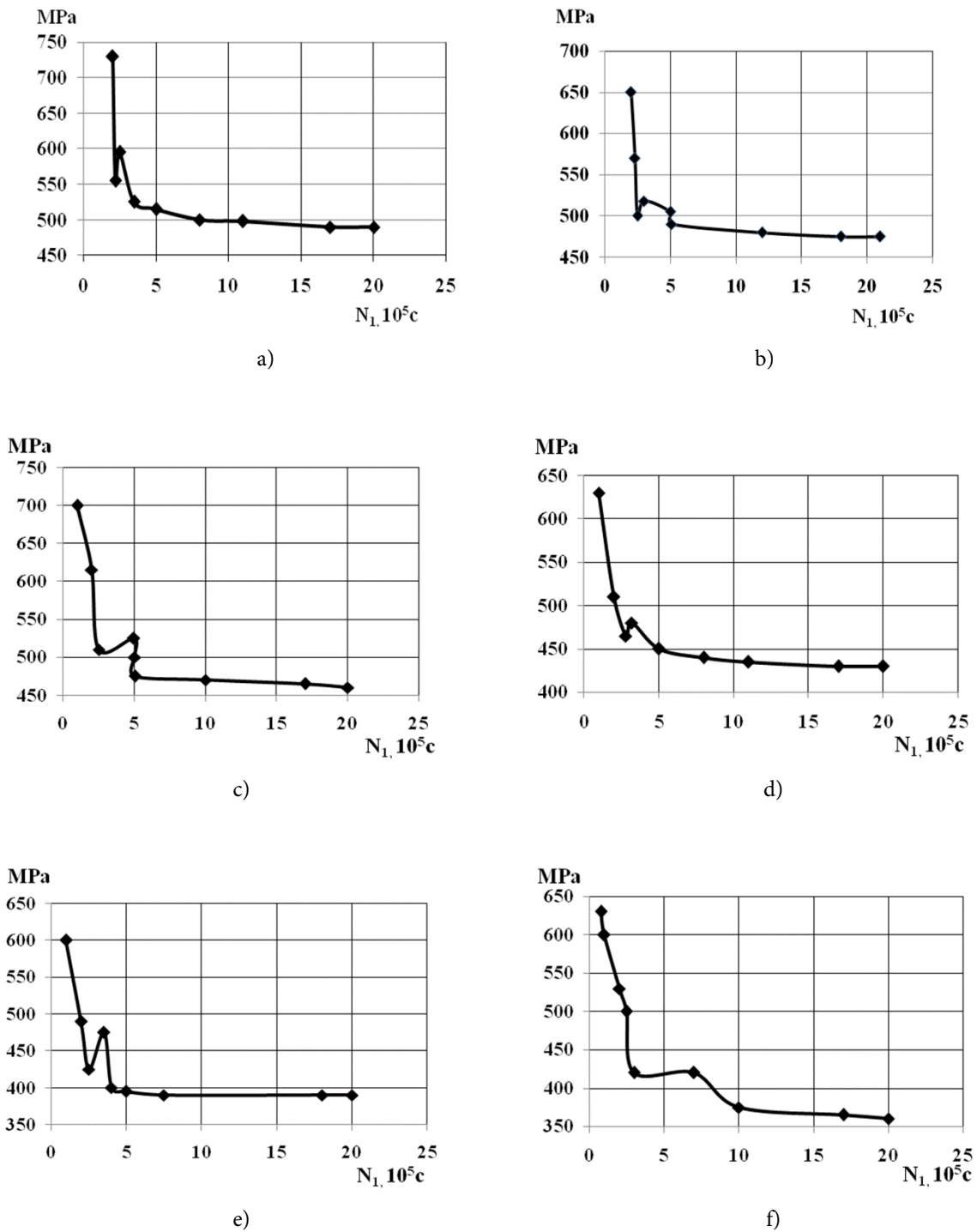
W związku z tym zwiększenie grubości warstwy ferrytycznej w kolonii perlitu, wraz ze wzrostem  $N_1$  (rys. 2), powoduje wystąpienie stałego spadku amplitudy cykli w obszarze ograniczonej wytrzymałości na zmęczenie stali węglowej (rys. 1).

*significant fluctuations in the cycle amplitude with concentration in a narrow range of cycles (Fig. 1a), to the almost horizontal section (Fig. 1e). For the corresponding conditions of cyclic loading, origin of such sections is caused by combined action of various factors. Thus, according to the work [1], the cause of the anomaly is violation of uniformity in the development of structural transformation processes under cyclic loading, in the deformation distribution homogeneity [2], or change of active crystallographic systems of dislocations glide [3].*

*The explanations based on the change in the stress state of the metal ahead of the growing fatigue fracture have become sufficiently widespread. It is believed that under conditions of low-cyclic fatigue, in the crack mouth a plain stress condition is realized and the fatigue area at the destruction surface of the fracture occupies relatively small area.*

*Other conditions of the crack growth are performed for the area of high-cyclic fatigue. Based on the analysis of the destruction surface, for the mentioned area the presence of characteristic features during displacement and delay of the growing crack front indicates formation of the forced plain stress condition. The obtained results for the position in go on the abscissa axis of the border between the areas of low- and high-cyclic fatigue ( $N_1$ ) for the investigated dispersion interval of the perlite colony showed the existence of the dependence on  $\lambda$ . After pair plotting of  $N_1$  against the corresponding values of  $\lambda$ , an unambiguous, directly proportional relationship between them was determined (Fig. 2). According to the given dependence increase in the ferrite layer thickness of perlite is accompanied by a significant shift of the value  $N_1$  in the direction of increasing the number of cycles.*

*Thus, increase in the ferrite layer thickness of perlite colony against the background of increase of  $N_1$  (Fig. 2) is in fact accompanied by a steady decrease in the cycle amplitude in the area of the limited endurance of carbon steel (Fig. 1).*

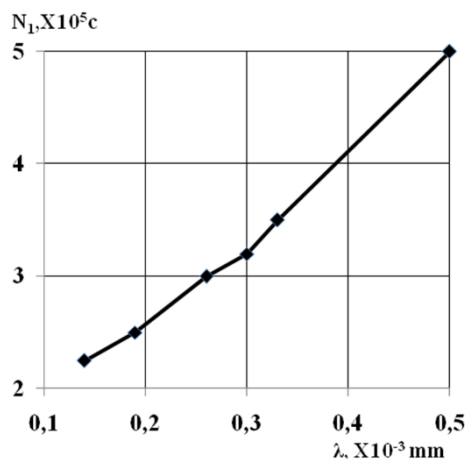


Rys. 1. Wpływ grubości warstwy ferrytycznej w kolonii perlitu  
(a - 0,14; b - 0,19; c - 0,26; d - 0,3; e - 0,33; f - 0,5  $\mu$ ) na przebieg krzywej zmęczeniowej

Fig. 1. Influence of the ferrite layer thickness of the perlite colony  
(a - 0.14; b - 0.19; c - 0.26; d - 0.3; e - 0.33; f - 0.5  $\mu$ ) on the fatigue curve

Mimo skomplikowanego charakteru zależności  $\sigma_a = f(N_i)$  (rys. 1), poprzez wykorzystanie zależności analitycznych, można w pewnym stopniu przewidywać zachowanie się metalu przy różnych warunkach zadawania obciążeń cyklicznych.

Despite rather complex nature of the relationship  $\sigma_a = f(N_i)$  (Fig. 1), the use of analytical dependencies can make it possible to a certain extent to predict the behavior of metallic materials under conditions of different degrees of cyclic overloading.



Rys. 2. Wpływ dyspersji perlitu na granicę pomiędzy obszarami krzywej zmęczenia cyklicznego o małej i dużej liczbie cykli

Fig. 2. Influence of the perlite dispersion on the border position between the areas of the curve with the low- and high-cyclic fatigue

Do analizy zależności pomiędzy amplitudą cyklu a ograniczoną wytrzymałością zmęczeniową wykorzystano równanie [2, 3]:

$$\sigma_a = K_a (N_i)^{-n} \quad (1)$$

gdzie  $K_a$  – jest stałą, a  $n$  – jest wykładnikiem. Po przekształceniu równania (1), otrzymuje się zależność umożliwiającą wyznaczenie współczynnika kąтового stycznej do krzywej zmęczeniowej ( $d\sigma_a / dN_i$ ) [4]:

$$\frac{d\sigma_a}{dN_i} = -\frac{n \cdot \sigma_a}{N_i} \quad (2)$$

W ujęciu formalnym, zależność ta jest miarą zmiany amplitudy cyklu w warunkach zwiększenia cyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej dla pojedynczego cyklu.

To analyze dependence the amplitude of cycle – limited endurance, used the relation [2, 3]:

$$\sigma_a = K_a (N_i)^{-n} \quad (1)$$

where  $K_a$  – is the constant,  $n$  – is the degree exponent. After transformation (1), a dependence for determining the angular coefficient of tangent of the fatigue curve ( $d\sigma_a / dN_i$ ) was obtained [4]:

$$\frac{d\sigma_a}{dN_i} = -\frac{n \cdot \sigma_a}{N_i} \quad (2)$$

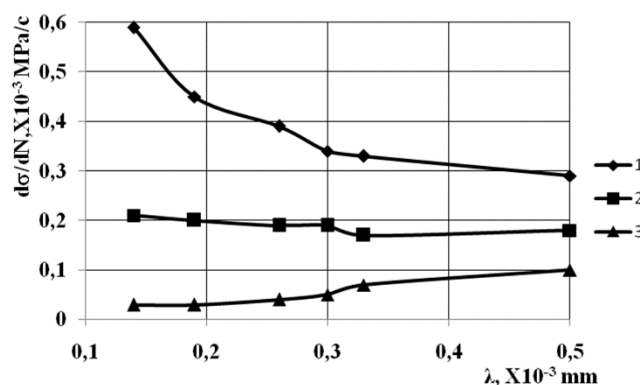
Formally, them mentioned characteristic is a measure of change in the cycle amplitude under conditions of increasing the cyclic endurance for one cycle.

Pamiętając o istnieniu różnych korelacji opisujących procesy tworzenia się i anihilacji defektów struktury krystalicznej, warunkujących ciągły rozwój odkształcenia plastycznego w procesie zmęczeniowym, można wywnioskować, że wartość  $d\sigma_a / dN_i$  powinna być charakterystyką wrażliwą na zmiany strukturalne. Zależność stosunku  $d\sigma_a / dN_i$  od wartości  $\lambda$  w przypadku krzywych zmęczeniowych zróżnicowanych jakościowo pokazano na rys. 3. Dla obszarów zmęczenia wywołanego małą liczbą cykli (krzywa 1), zależność pomiędzy  $d\sigma_a / dN_i$  i  $\lambda$  jest odwrotnie proporcjonalna.

Zgodnie z przedstawioną zależnością, można stwierdzić, że im grubsze są płytki w strukturze kolonii perlitu, tym mniej powinna być zmniejszona amplituda cyklu dla uzyskania przyrostu wytrzymałości zmęczeniowej materiału. Jeśli w obszarze przejściowym pomiędzy małą i dużą liczbą cykli zmęczeniowych wpływ wielkości  $\lambda$  na wartość  $d\sigma_a / dN_i$  jest prawie niezauważalny (krzywa 2), to w przypadku cyklu zmęczeniowego o wysokiej liczbie cykli zachodzi zależność wprost proporcjonalna (krzywa 3). Zgodnie z równaniem (2), przy nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, jeśli  $N_i \rightarrow \infty$  i  $\sigma_a = \sigma_{-1}$ , gdzie  $\sigma_{-1}$  oznacza graniczne naprężenie zmęczeniowe, wartość  $d\sigma_a / dN_i \rightarrow 0$  (rys. 1).

Taking into account existence of different correlation in the development of the processes of nucleation and annihilation of crystalline structure defects to support the conditions for the continuous distribution of plastic deformation during fatigue, one can assume that  $d\sigma_a / dN_i$  should be a structurally sensitive characteristic. Dependence of value  $d\sigma_a / dN_i$  on  $\lambda$  for the qualitatively different parts of the fatigue curve is shown in the Fig. 3. For the area with the low-cyclic fatigue (curve 1), the relation between  $d\sigma_a / dN_i$  and  $\lambda$  has an inverse proportional form.

According to the given dependence it should be considered that the cruder the plate structure of the perlite colony, the lesser should be reduced the cycle amplitude to increase the fatigue endurance. If for the transition area from the low- to high-cyclic fatigue, in appearance there is almost no influence of  $\lambda$  on the value  $d\sigma_a / dN_i$  (curve 2), then for the high-cyclic fatigue there is a unique directly proportional dependence (curve 3). According to the relation (2), under conditions of unlimited endurance, when  $N_i \rightarrow \infty$ , and  $\sigma_a = \sigma_{-1}$ , where  $\sigma_{-1}$  – is the fatigue stress limit,  $d\sigma_a / dN_i \rightarrow 0$  (Fig. 1).



Rys. 3. Zależność  $d\sigma_a / dN_i$  od  $\lambda$  dla różnych wartości ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej  $2 \cdot 10^5$  – (1),  $5 \cdot 10^5$  c – (2),  $5 \cdot 10^6$  c – (3)

Fig. 3. Dependence of  $d\sigma_a / dN_i$  on  $\lambda$  for different level of the limited endurance  $2 \cdot 10^5$  – (1),  $5 \cdot 10^5$  c – (2),  $5 \cdot 10^6$  c – (3)

Biorąc pod uwagę dyslokacyjny mechanizm przy rozwoju odkształceń plastycznych podczas obciążeń cyklicznych, w pełni zasadne jest przypuszczenie o istnieniu zależności pomiędzy liczbą skumulowanych dyslokacji w strukturze metalu oraz wartości liczby cykli przy jego obciążaniu. Z analizy przeprowadzonej dla  $\lambda = 0,14 \mu\text{m}$  oraz dwóch wartości  $d\sigma_a / dN_i = 0,05$  i  $d\sigma_a / dN_i = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ MPa/s}$  wynika, że gęstość dyslokacji ( $\rho_{211}$ ) w strukturze metalu po zniszczeniu próbki wynosiła odpowiednio  $19,0$  i  $7,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Biorąc pod uwagę taki sam charakter wpływu  $\lambda$  na zachowanie stali węglowej w warunkach obciążeń statycznych i cyklicznych [5], należy przewidywać, że wartość  $d\sigma_a / dN_i$  może być miarą nagromadzenia się defektów w strukturze krystalicznej w warunkach obciążania cyklicznego.

#### 4. PODSUMOWANIE

1. Na podstawie analizy krzywych zmęczeniowych stali węglowej o różnej dyspersji ziaren perlitu określono wrażliwość strukturalną w obszarze granicznym pomiędzy małą a dużą liczbą cykli zmęczeniowych.
2. Zmniejszając grubość warstwy ferrytycznej kolonii perlitu, można stworzyć korzystne warunki dla występowania dużej liczby cykli zmęczeniowych.
3. Dla warunków ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej wykazano istnienie odwrotnie proporcjonalnej zależności pomiędzy współczynnikiem kątowym stycznej do krzywej zmęczeniowej i gęstością skumulowanych dyslokacji po zniszczeniu próbki.

#### PODZIĘKOWANIA

Badania zostały wykonane w latach 2013–2015 w Państwowym Uniwersytecie Transportu Kolejowego w Dnipro, finansowane ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Ukrainy, nr grantu 0113U000687 oraz w ramach badań statutowych

*Taking into account the dislocation mechanism for the distribution of plastic deformation during cyclic loading, it is fully justified to expect the existence of dependence of the number of accumulated dislocations in a metal on the degree of its cyclic over loading. The evaluation made for  $\lambda = 0.14 \mu\text{m}$  and two values  $d\sigma_a / dN_i$  0.05 and  $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ MPa/c}$  showed that the accumulated density of dislocations ( $\rho_{211}$ ) in the metal after the samples destruction was 19 and  $7.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , correspondingly. Taking into account the same nature of influence of  $\lambda$  on the carbon steel behavior under conditions of the static and cyclic loadings [5], it should be expected that  $d\sigma_a / dN_i$  may be a measure of defects accumulation in the crystalline structure under conditions of cyclic loading.*

#### 4. CONCLUSIONS

1. *From the analysis of curves fatigue carbon steel with different dispersion of perlite, the structural sensitivity of the transition border from the low- to high-cyclic fatigue, was determined.*
2. *Decrease of ferrite layer thickness of perlite colony contributes to the achievement of conditions to high-cyclic fatigue.*
3. *Under conditions of limited endurance, the existence of a qualitative inverse proportional relationship between the angular coefficient of the tangent curve of fatigue and the density of accumulated dislocations after the destruction of the metal is determined.*

#### ACKNOWLEDGEMENTS

*The research was carried out in the years 2013–2015 at the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport in Dnipro, financed from the funds of the Minister of Science and Education of Ukraine, grant no. 0113U000687 and as*



prowadzonych w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej.

part of statutory research conducted at the Institute of Plastic Working and Safety Engineering of the Czestochowa University of Technology.

## LITERATURA

- [1] Boardman B. 1990. *Fatigue resistance of Steels*. ASM Handbook, v.1.
- [2] Kareem A, S. Talabi, J. Adebisi et al. 2015. „Fatigue Behaviour of Medium Carbon Steel of Different Grain Structures”. *Industrial Engineering Letters* 5 (3): 10.
- [3] Shao W., P. Zhang, R. Liu et al. 2016. „A remarkable improvement of low-cycle fatigue resistance of high-Mn austenitic TWIP alloys with similar tensile properties: Importance of slip mode”. *Acta Materialia* 118: 196.
- [4] Vakulenko I. 2012. *Vtoma metalevikh materialiv v konstrukciyakh rukhomogo skladu*. Dnipropetrovsk: Makoveckiyj.
- [5] Vakulenko I., V. Boljshakov. 2008. *Morfologiya strukturih i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnepropetrovsk: Makoveckiyj.

## REFERENCES

- [1] Boardman B. 1990. *Fatigue resistance of Steels*. ASM Handbook, v.1.
- [2] Kareem A, S. Talabi, J. Adebisi et al. 2015. “Fatigue Behaviour of Medium Carbon Steel of Different Grain Structures”. *Industrial Engineering Letters* 5 (3): 10.
- [3] Shao W., P. Zhang, R. Liu et al. 2016. “A remarkable improvement of low-cycle fatigue resistance of high-Mn austenitic TWIP alloys with similar tensile properties: Importance of slip mode”. *Acta Materialia* 118: 196.
- [4] Vakulenko I. 2012. *Vtoma metalevikh materialiv v konstrukciyakh rukhomogo skladu*. Dnipropetrovsk: Makoveckiyj.
- [5] Vakulenko I., V. Boljshakov. 2008. *Morfologiya strukturih i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnepropetrovsk: Makoveckiyj.

