

## WPLYW WĘGLIKÓW PIERWOTNYCH NA INICJACJĘ MIKROPEKNIĘĆ W STALI SZYBKOTNĄCEJ

JERZY WODECKI

*Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska  
e-mail: jerzy.wodecki@polsl.pl*

Streszczenie. Poddano analizie oddziaływanie inkluzji na lokalną koncentrację naprężeń w płaskim stanie odkształceń, w mikrostrukturze stali szybkoctnej HS6-5-2. Metodą analityczną, w skali mezo, wyznaczono wartości naprężenia na powierzchni rozdziału węglików pierwotnych i osnowy. Wykazano oddziaływanie kształtu węglików na wartości naprężeń powierzchniowych. Porównano krytyczne wartości naprężenia ściskającego i rozciągającego, inicjujących mikropeknienia w węglkach, z właściwościami wytrzymałościowymi stali szybkoctnej.

### 1. WSTĘP

Stal szybkoctna należy do grupy materiałów, które ze względu na ich znaczenie w przemyśle ciągle znajdują się w centrum zainteresowania. Mikrostruktura stali szybkoctnej zapewnia dużą twardość oraz odporność na zużycie, a jednocześnie wytrzymałość i trwałość. Właściwości te uzyskuje się dzięki obecności w mikrostrukturze tej stali twardych węglików pierwotnych oraz węglików wtórnych, w osnowie odpuszczonego martenzytu.

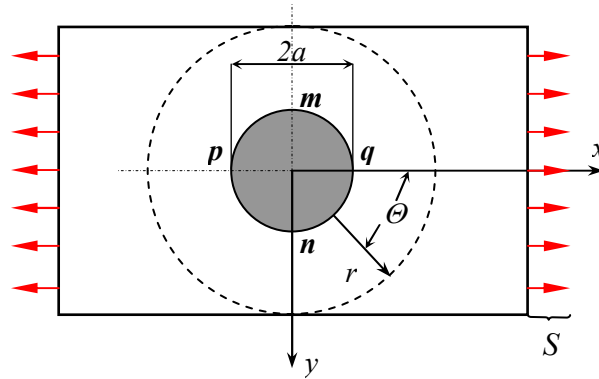
Badania procesu pęknięcia stali szybkoctnej wykazały, że pęknięcia zarodkują w kruchych węglkach pierwotnych. Osnowa stali szybkoctnej, w skali makro, charakteryzuje się dużą skłonnością do pęknięcia kruchego. Z tego względu kryteria pęknięcia plastycznego, zakładające wzrost porów w materiale osnowy, są nieprzydatne w prognozowaniu właściwości wytrzymałościowych tej stali [2].

W mezomechanice przyjęto, że w materiałach niejednorodnych, takich jak np. stal szybkoctna, twarde cząsteczki drugiej fazy odgrywają istotną rolę w lokalnym intensyfikowaniu naprężeń. W konsekwencji może to prowadzić do inicjacji mikropeknień i dekohezji materiału. Wartości tych naprężeń zależą od kształtu wydzieleń oraz ich właściwości mechanicznych, a także właściwości mechanicznych osnowy.

W pracy przedstawiono wpływ kształtu węglików pierwotnych na wartość naprężeń w stali szybkoctnej HS6-5-2. Naprężenia na powierzchni węglików pierwotnych wyznaczono metodą analityczną, w skali mezo, przyjmując płaski stan odkształceń. Wartość naprężenia w osnowie wyznaczono na podstawie równania konstytutywnego dla materiału osnowy, przy założonej wartości odkształcenia.

## 2. METODA ANALITYCZNA OBLICZANIA NAPRĘŻEŃ NA POWIERZCHNI INKLUZJI

W analizie, w skali mezo, stanu naprężeń na powierzchni wydzieleń węglików pierwotnych przyjęto model inkluzji w kształcie walca, otoczonej osnową, w obecności naprężenia rozciągającego  $S$  (rys. 1).



Rys. 1. Schemat modelu inkluzji

Naprężenia w otoczeniu inkluzji wyznaczono z zależności [3]:

$$\sigma_r = \frac{S}{2} \left\{ 1 + \frac{1 + 2\alpha_1\beta - 2\alpha_2 - \beta}{2\alpha_2 + \beta - 1} \left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left[ 1 - \frac{4(1-\beta)}{1-\beta + 4\alpha_1\beta} \left(\frac{a}{r}\right)^2 + \frac{3(1-\beta)}{1-\beta + 4\alpha_1\beta} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right] \cos 2\Theta \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{S}{2} \left\{ 1 - \frac{1 + 2\alpha_1\beta - 2\alpha_2 - \beta}{2\alpha_2 + \beta - 1} \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \left[ 1 + \frac{3(1-\beta)}{1-\beta + 4\alpha_1\beta} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right] \cos 2\Theta \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{S}{2} \left\{ 1 + \frac{2(1-\beta)}{1-\beta + 4\alpha_1\beta} \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \frac{3(1-\beta)}{1-\beta + 4\alpha_1\beta} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \sin 2\Theta \quad (3)$$

gdzie:  $S$  – naprężenie rozciągające,

$E$  – moduł Younga,

$\nu$  – współczynnik Poissona,

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  – moduł Kirchhoffa,

$G_1$  – moduł Kirchhoffa osnowy,

$G_2$  – moduł Kirchhoffa inkluzji,

$\beta = \frac{G_2}{G_1}$ ,

$a$  – promień inkluzji,

$\alpha_i = \begin{cases} 1 - \nu_i & \text{dla płaskiego stanu odkształceń, } i = 1, 2, \\ (1 + \nu_i)^{-1} & \text{dla płaskiego stanu naprężeń.} \end{cases}$

Do obliczenia naprężeń na powierzchni węglików pierwotnych przyjęto właściwości mechaniczne charakteryzujące stal szybkotnącą HS6-5-2 (Tablica 1).

Tablica 1. Właściwości mechaniczne węglików pierwotnych i osnowy stali HS6-5-2 [1, 2]

Właściwość	Węgliki	Osnowa
Moduł Younga, GPa	MC 351 M <sub>6</sub> C 286	240
Współczynnik Poissona	0,19	0,30
Stosowane kryterium zniszczenia	maksymalne naprężenie rozciągające	odkształcenie plastyczne
Wartość krytyczna dla przyjętego kryterium	1500 MPa	0,1%

Próby rozciągania in-situ wykonane przy zastosowaniu mikroskopu skaningowego wykazały, że pęknięcia próbek wykonanych ze stali szybkotnącej następują już przy małych wartościach odkształcenia plastycznego osnowy.

Podobne wyniki uzyskano, stosując obliczenia modelowe metodą elementów skończonych. Wykazano, że zarodkowanie mikropęknięć w osnowie występuje przy jej odkształceniu plastycznym  $\varepsilon = 0,1\%$ . Te mikropęknięcia wywoływały z kolei pękanie znajdujących się w ich pobliżu węglików [1].

W badaniach pękania stali HS6-5-2, przeprowadzonych metodą analityczną, przyjęto więc, że naprężenia występujące w osnowie powstaną na skutek jej odkształcenia plastycznego o wartości  $\varepsilon = 0,1\%$ .

Dla określenia wartości naprężenia rozciągającego  $S$  w równaniach (1) ÷ (3), zastosowano równanie konstytutywne, które dla osnowy stali szybkotnącej ma postać [1]

$$\sigma = 1500 + 1101 [1 - \exp(-\varepsilon/0,00369)] \quad (4)$$

gdzie:  $\sigma$  – naprężenie normalne przy rozciąganiu, MPa,  
 $\varepsilon$  – odkształcenie plastyczne w kierunku  $\sigma$ .

Na podstawie zależności (4) wyznaczono wartość  $S = 1761$  MPa.

Pozostałe wartości współczynników występujących w równaniach (1) ÷ (3) podano w tablicy 2.

Tablica 2. Wartości współczynników równań (1) ÷ (3), dla modelu inkluzji – węglík otoczony osnową

Wartość obliczona	Osnowa	Typ węgliká	
		MC	M <sub>6</sub> C
Moduł Kirchhoffa, MPa	120	147	120
$\alpha_1$	0,70	-	-
$\alpha_2$	-	0,81	0,81
$\beta$	-	1,70	1,35

Wartości naprężeń określonych na podstawie zależności (1) ÷ (3) w punktach  $q$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $m$  inkluzji (rys. 1) przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Wartości naprężeń na powierzchni inkluzji – węglík otoczony osnową

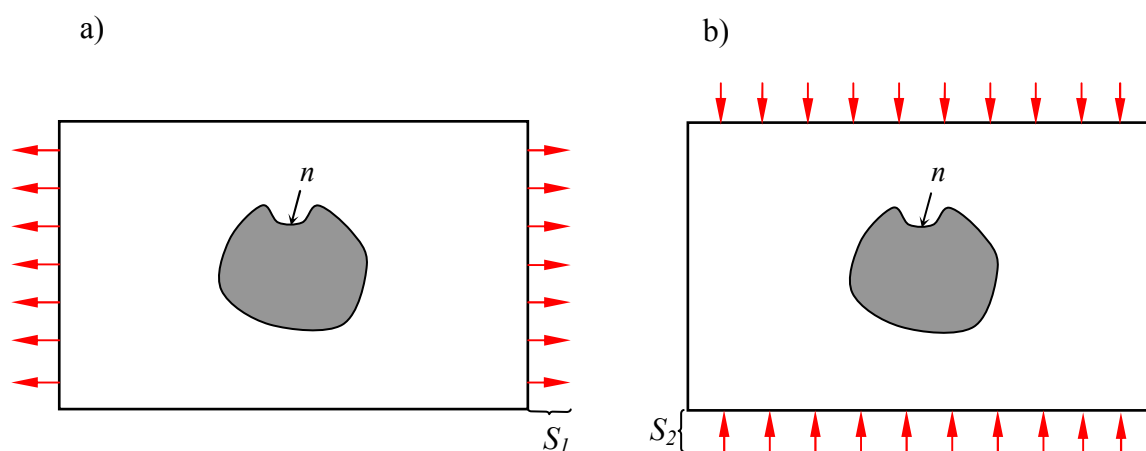
Wartość obliczona, MPa	Typ węgliká			
	MC		M <sub>6</sub> C	
	pt. $q$ , $p$	pt. $n$ , $m$	pt. $q$ , $p$	pt. $n$ , $m$
$\sigma_r$	1356	449	1092	599
$\sigma_\theta$	- 211	663	- 291	924
$\sigma_{r\theta}$	0	0	0	0

Uzyskane wartości naprężeń na powierzchni węglików pierwotnych, dla przyjętego modelu inkluzji, nie przekraczają ich wytrzymałości na rozciąganie (1500 MPa). Można więc założyć, że wydzielienia węglików o idealnym, walcowym kształcie nie będą inicjatorami mikropekníeć przy założonej wartości odkształcenia  $\varepsilon = 0,1\%$ .

Rzeczywisty kształt węglików pierwotnych jest jednak nieregularny. Mogą występować na ich powierzchniach zagłębienia (rys. 2a). W ich obszarach wartości naprężeń są większe od naprężeń na powierzchni idealnie walcowej. W badaniach modelowych, przeprowadzonych metodą numeryczną, procesu pęknięcia stopu aluminium wzmocnionego twardymi cząstkami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stwierdzono, że w zagłębieniach tych cząstek inicjowane są mikropekníećcia [3].

Kształt zagłębíeń na powierzchni wydzieleń węglików jest różny. Do wyznaczenia wartości naprężeń przyjęto stan „graniczny”. Założono, że inkluzje z materiału osnowy otoczone są wydzielieniami z węglików. Zamieniono więc właściwości materiału inkluzji i osnowy, przyjmując, że miękkie inkluzje otoczone są twardymi wydzielieniami węglików.

Do wyznaczenia wartości naprężeń przyjęto, jak poprzednio, zależności (1) ÷ (3). Uzyskane wartości naprężeń przedstawiono w tabelicy 5.



Rys. 2. Schemat modelu inkluzji o nieregularnym kształcie;  
a) naprężenie rozciągające, b) naprężenie ściskające

Tablica 4. Wartości współczynnika  $\beta$  w równaniach (1) ÷ (3) dla modelu inkluzji  
– materiał osnowy otoczony węglnikami typu MC i  $M_6C$

Typ węglika	Współczynnik $\beta$
MC	0,60
$M_6C$	0,74

Tablica 5. Wartości naprężeń na powierzchni inkluzji  
– materiał osnowy otoczony węglnikami typu MC i  $M_6C$

Wartość obliczona, MPa	Typ węglika			
	MC		$M_6C$	
	pt. $q, p$	pt. $n, m$	pt. $q, p$	pt. $n, m$
$\sigma_r$	<b>1582</b>	125	<b>1717</b>	132
$\sigma_\theta$	<b>-951</b>	<b>1708</b>	-863	1400
$\sigma_{r\theta}$	0	0	0	0

Wyznaczone wartości naprężeń, zarówno dla węglików MC jak i  $M_6C$ , są większe od ich wytrzymałości na rozciąganie. Powstają więc warunki do tworzenia się mikropeknięcia.

### 3. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń wartości naprężeń, przeprowadzonych w skali mezo metodą analityczną, można przyjąć, że węgliki pierwotne w osnowie stali już przy małym odkształceniu ( $\varepsilon = 0,1\%$ ) inicjują mikropekania w stali szybko tnącej HS6-5-2.

Duży wpływ na koncentrację naprężeń ma kształt węglików. Węgliki o kształcie nieregularnym pękają przy mniejszych wartościach naprężeń, w porównaniu z węglkami o kształcie kulistym.

Pęknięcia węglików pierwotnych w stali szybko tnącej mogą być wywołane w obecności zarówno naprężenia rozciągającego jak i ściskającego (rys. 2). W obliczeniach wartości naprężeń w punkcie „n”, dla naprężenia rozciągającego  $S_1$ , uzyskano wartość naprężenia  $\sigma_\theta = 1708$  MPa na powierzchni węglików MC. Dla naprężenia ściskającego  $S_2$  wartość naprężenia w tym punkcie wynosi  $\sigma_\theta = 951$ . Przyjęto, że pęknięcie węglika nastąpi w obu przypadkach przy takiej samej wartości naprężenia  $\sigma_\theta$ , stąd bezwzględna wartość naprężenia ściskającego  $S_2$ , wywołującego pęknięcie, powinna być ok. 1,8 razy większa od naprężenia rozciągającego  $S_1$ .

Interesujące wydaje się porównanie wartości naprężenia ściskającego i rozciągającego uzyskanych w skali mezo, powodujących pękanie węglików, z właściwościami stali szybko tnącej HS6-5-2 w skali makro. Średnia wartość granicy wytrzymałości na ściskanie stali szybko tnącej wynosi  $R_c = 3924$  MPa, natomiast wytrzymałości na rozciąganie  $R_m = 2060$  MPa [4]. Iloraz proporcji tych wartości wynosi ok. 1,9 i jest zbliżony do wartości ilorazu krytycznych wartości naprężenia ściskającego i rozciągającego w skali mezo, uzyskanych na podstawie przeprowadzonej analizy.

### LITERATURA

1. Mishnaevsky L. Jr., Lippmann N., Schmauder S.: Computational modeling of crack propagation in real microstructures of steels and virtual testing of artificially designed materials. "International Journal of Fracture" 2003, Vol. 120, p. 581–600.
2. Mishnaevsky L. Jr., Weber U., Schmauder S.: Numerical analysis of the effect of microstructures of particle-reinforced metallic materials on the crack growth and fracture resistance. "International Journal of Fracture" 2004, Vol. 12, p. 30–50.
3. Balokhonov R.R., Romanova V.A., Schmauder S.: Computational analysis of deformation and fracture in composite material on the mesoscale level. Computational Materials Science, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Workshop on Computational Mechanics of Materials 2006, Vol. 37, p. 110-118.
4. Kunstetter S.: Narzędzia skrawające do metali: konstrukcja. Warszawa: WNT, 1973.

## THE INFLUENCE OF PRIMARY CARBIDES ON THE INITIATION OF MICROCRACKS IN HIGH SPEED STEEL

Summary. The influence of inclusions on the local concentration of stresses in plane strain state in microstructure of high speed steel HS6-5-2 was analyzed. Using analytical method, in mesoscale level, the values of stresses on the separation surface of primary carbides and matrix were calculated. The influence of the shape of carbides on the magnitude of surface tension was shown. The critical values of stresses causing microcracks in carbides in case of compression and tension were compared with strength characteristics of high speed steel.