

dla $-5^{\circ}\text{C} \leq TW \leq 0^{\circ}\text{C}$, aż do 0,79 dla $TW \leq -5^{\circ}\text{C}$ i $0^{\circ}\text{C} \leq TW \leq 5^{\circ}\text{C}$. Jak już wspomniano, badano również analogiczne złącza ze stali S235JR ($f_u = 360$ MPa), wykonywane w temperaturze otoczenia $TW > 0^{\circ}\text{C}$. Uzyskana z badań eksperymentalnych średnia wartość współczynnika korelacji $\beta_{w,R}$ tych złączy wyniosła 0,47, podczas gdy w przypadku stali normowej $\beta_w = 0,8$.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonej serii badań doświadczalnych nośności ścinanych złączy spawanych w połączeniach widełkowych wskazują na istotny wpływ wytrzymałości zastosowanego drutu spawalniczego na rzeczywistą nośność spoin pachwinowych. Badane złącza spawane elementów ze stali S355JR, z zastosowaniem drutu spawalniczego G4Si1, wykazały znacznie większą nośność rzeczywistą przy ich ścinaniu w stosunku do nośności, obliczonej na podstawie normy [1]. Uzyskany wzrost nośności wyniósł 14–22% dla stali S355J2, a dla stali S235JR był jeszcze większy. Wynikali

on z dużej wytrzymałości drutu spawalniczego na rozciąganie, znacznie większej niż podawana w specyfikacji dostawcy. Badania potwierdziły zjawisko wyraźnie większej nośności materiału spoiny w płaszczyźnie ścięcia w stosunku do wytrzymałości materiału łączonych elementów. Fakt ten jest częściowo uwzględniany w normowych zasadach [1] wyznaczania nośności spoin pachwinowych przez współczynnik korelacji β_w , którego wartość wynosi 0,8–1,0 w zależności od gatunku stali. Wyniki badań wskazują, że wartość tego współczynnika w przypadku stali S355 może być znacznie mniejsza niż normowa 0,9 (rysunek 4), co skutkuje znacznym zwiększeniem nośności ścinanej spoiny pachwinowej (rysunek 3). Celowe jest więc prowadzenie dalszych badań eksperymentalnych, których wyniki pozwoliłyby na urealnienie wartości współczynnika korelacji β_w i uzależnienie jej od wytrzymałości zastosowanego drutu spawalniczego oraz technologii i warunków spawania, które mają wpływ na strukturę materiału spoiny.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-8: 2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [2] Khurshid M., Barsoum Z. i Mumtaz N. A.: Ultimate strength and failure modes for fillet welds in high strength steels. *Materials and Design*, 40, 2012, 36–42.
- [3] Koshiishi F.: Welding materials: an overview. *Welding International*, 24 (9), 2010, 706–713.
- [4] Picón R., Canas J.: On strength criteria of fillet welds. *International Journal of Mechanical Sciences* (51), 2009, 609–618.
- [5] Hicks J.: *Welded design – theory and practice*. Cambridge: Abington Publishing, Cambridge, 2000.
- [6] Leitner M., Fössl T., Stoschka M. i Eichseder W.: Evaluation of fillet weld properties and fatigue behaviour in dependence of welding parameters. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, 11 (3), 2011, 651–660.
- [7] Bijlaard F.: Eurocode 3, a basis for further development in joint design. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 2006, 1060–1067.
- [8] Sedlacek G., Stangenberg H.: Design philosophy of Eurocodes – background information. *Journal of Constructional Steel Research* (54), 2000, 173–190.
- [9] PN-EN 10025-2: 2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.

prof. dr hab. inż. Kazimierz Rykaluk*
dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWR**

Inicjowanie pęknięć zmęczeniowych w blachownicowych belkach podsuwnicowych

Initiation of fatigue cracks in plated crane beams

Streszczenie. Cykliczne obciążenie użytkowe belek podsuwnicowych, w kierunku pionowym i poziomym, ma rolę dominującą w obciążeniu ogólnym. Przy nieuniknionym narażeniu górnej strefy przekroju belki na skręcanie już po kilku latach eksploatacji mogą pojawić się podłużne pęknięcia środnika pod pasem górnym. Taki typ karbu nie jest sklasyfikowany w normach europejskich. W artykule podano warunki wystarczającej wytrzymałości środnika na inicjowanie pęknięć zmęczeniowych niskocyklowych.

Słowa kluczowe: belka podsuwnicowa, obciążenie cykliczne, pęknięcie zmęczeniowe.

Abstract. The cyclic working load of crane beams in vertical and horizontal direction constitutes a dominant role in the total load. For an inevitable exposure to torsion of the upper portion of the cross-section, after few years of operation, the longitudinal cracks of the web adjacent to the upper flange might appear. This type of notch is not classified in the European standards. The conditions of required strength of the web due to low-cycle fatigue crack initiations are given herein.

Keywords: runway beam, cyclic load, fatigue cracking.

Z obserwacji eksploatowanych torów podsuwnicowych wynika, że już po 6 ÷ 10 latach pojawiają się uszkodzenia stalowych belek podsuwnicowych oraz belek jezdnych przonośników rewersyjnych węgla [1]. Najliczniejsze

uszkodzenia (ok. 80%) występują w zamocowaniu szyn do belek. Następne miejsca zajmują takie uszkodzenia, jak: przesunięcia osi belki od stanu początkowego (ok. 70%); mocowania belek głównych i belek hamownych do słupów (ok. 50%); pęknięcia zmęczeniowe belek w górnej (ściskanej) strefie środnika i w spoinach pasowych (ok. 30%); pęknięcia w tężniakach hamownych (ok. 25%);

nadmierne przesunięcia szyn względem środnika (ok. 20%).

W świetle normowej klasyfikacji oddziaływań zmęczeniowych dźwignic [2, 3], największemu uszkodzeniu ulegają belki pod suwnice odlewnicze, kleszczowe i wsadowe, a więc belki klasy $S_6 + S_9$. Główne czynniki wywołujące uszkodzenia to: dynamiczne oddziaływania ruchomych nacisków kół suwnic o dużej wartości; cykliczność oddziały-

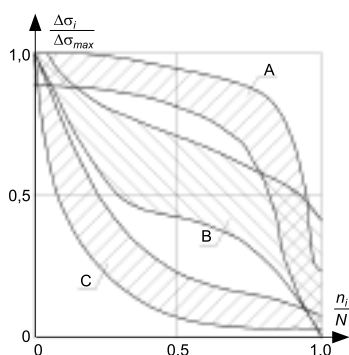
* Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

** Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

wań; mimośrodowe ułożenie szyny względem osi środka; złożony stan naprężenia w środku; własne naprężenia spawalnicze; nierówności w płaszczyźnie kontaktu szyny z półką; sztywność pionowa mostu suwnicy, powodująca zróżnicowanie nacisków kół na szynę podczas uginania się belki; wady spoin; ukosowanie mostu suwnicy.

Przyczyny i miejsca inicjowania pęknięć zmęczeniowych

Spśród stalowych konstrukcji budowlanych tory podsuwnicowe oraz podtorza przenośników są konstrukcjami o niekorzystnym, w aspekcie zmęczenia materiału, widmie obciążeń cyklicznych. Charakteryzuje się ono stosunkowo dużą jednorodnością względnego zakresu zmienności naprężeń $\Delta\sigma_i/\Delta\sigma_{max}$ w zależności od względnej liczby cykli n_i/N , znacznie większą niż w przypadku mostów kolejowych, co poglądowo przedstawiono na rysunku 1



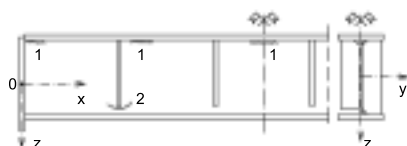
Rys. 1. Obszary rozrzutów względnego zakresu zmienności naprężeń $\Delta\sigma_i/\Delta\sigma_{max}$ w zależności od względnej liczby cykli n_i/N w przypadku: mostów suwnicowych (A); belek podsuwnicowych (B); mostów kolejowych (C)

wg [4]. Oznaczono na nim przez N całkowitą liczbę cykli w okresie eksploatacji T toru podsuwnicowego, przez $i - i$ -ty cykl obciążenia, zaś przez $\Delta\sigma_i$ – różnicę między naprężeniem maksymalnym i minimalnym w określonym punkcie przekroju belki w i -tym cyklu obciążenia, czyli:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{max,i} - \sigma_{min,i} \quad (1)$$

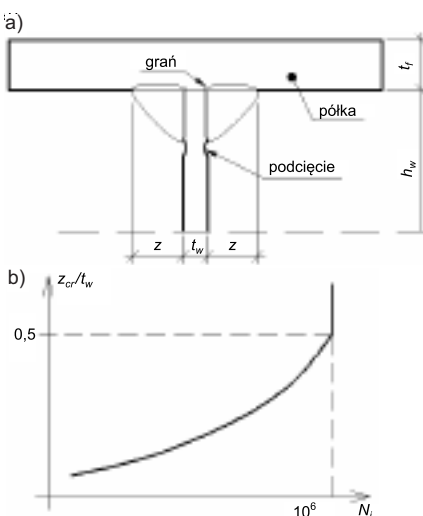
Z rysunku 1 wynika, że największą jednorodnością obciążenia cyklicznego odznaczają się konstrukcje mostów suwnicowych, zbliżając się do obciążeń prawie jednorodnych, jakim są poddane np. osie wirników w silnikach elektrycz-

nych. **Pęknięcia zmęczeniowe** spawanych belek podsuwnicowych występują najczęściej w środku przy krawędzi spoiny czołowej lub pachwinowej i są oznaczane w literaturze jako **typ nr 1** [1, 5, 10, 12], co pokazano na rysunku 2. Usytuowanie miejsca pęknięcia



Rys. 2. Potencjalne miejsca inicjowania i oznaczenia cyfrowe pęknięć zmęczeniowych

w danym panelu środka zależy od stosunku momentu zginającego do siły poprzecznej. W panelu przy podporowym pęknięcie powstaje w narożniku panelu, zaś w panelu środkowym przęśla – w środku długości panelu. Główną przyczyną pęknięć nr 1 jest działanie momentu skręcającego pas górny, pochodzącego od mimośrodowego pionowego nacisku kół suwnicy oraz sił poziomych od hamowania wózka, przekazujących się w poziomie styku kół z szyną. Środek pod spoiną pasową zawiera podłużne podcięcia materiału (rysunek 3a), jako efekt spawania [6]. Takie wady są ewidentnymi koncentratorami naprężeń zwiększających ryzyko pęknięcia zmęczeniowego. W przypadku nieuniknionych wstępnych imperfekcji geometrycznych belki, jakimi są wygięcia środka oraz mimośrodowe ułożenie szyny nad środkami, po przeciwnej stronie



Rys. 3. Krytyczny względny bok spoiny pachwinowej z_c/t_w : a) schemat połączenia półki ze środkiem; b) zależność względnego boku od liczby cykli inicjujących N_i

wypukłości środka naprężenia normalne w kierunku pionowym (od nacisku koła i od momentu skręcającego) mogą przekraczać granicę plastyczności materiału. Wówczas styczne naprężenia główne inicjują rysy zmęczenia niskocyklowego.

Pęknięcia zmęczeniowe nr 1 mogą się też inicjować w grani spoiny pachwinowej, jeżeli względna długość boku spoiny z/t_w (rysunek 3a) jest mniejsza od wartości krytycznej z_c/t_w , zależnej od liczby cykli obciążenia, jak na rysunku 3b [7]. Jeżeli inicjowanie pęknięcia następuje przy liczbie cykli $N_i \approx 10^6$, to względna długość krytyczna boku wynosi $z_c/t_w \approx 0,5$. Z rysunku 3b wynika, że przy zbyt cienkich spoinach pachwinowych inicjowanie pęknięcia w grani rozpoczyna się przy małej liczbie cykli.

Jeżeli połączenie środka z półką jest wykonane za pomocą spoiny czołowej, to odpada wewnętrzne ognisko inicjowania się pęknięcia, natomiast środk z podcięciami jest tak samo narażony na pęknięcia, jak w przypadku zastosowania spoin pachwinowych. W obydwu przypadkach połączenia spawanego inicjowanie się pęknięć środka jest tym szybsze, im większa jest smukłość środka $\lambda_w = h_w/t_w$. Większe są bowiem wtedy przyrosty wygięć środka pod przesuwającym się obciążeniem i tym samym większe naprężenia od zginania środka w pewnej odległości od półki (rysunek 4). U dołu rysunku 4 widoczny jest przełom obejmujący całą grubość t_w , natomiast poniżej spoin pasowych – zaawansowane stadium propagujących pęknięć po obu



Rys. 4. Pęknięcia zmęczeniowe środka belki wskutek cyklicznego jego zginania z płaszczyzny

stronach środka belki o przekroju IKS 1000-4 w jednym z przęseł belek toru pod przenośniki rewersyjne na węgiel brunatny w jednej z elektrowni [8]. Środek grubości $t_w = 7$ mm miał smukłość $\lambda_w = 1000/7 = 142$.

Pęknięcia typu 2 występują na końcach żebrow poprzecznych, które nie są łączone z rozciąganym pasem dolnym (na rysunku 2 w przekroju poprzecznym pokazano alternatywne zakończenie żebr). W większości przypadków pęknięcia typu 2 mają charakter pęknięć kruchych, zaistniałych podczas transportu lub montażu belek. Za przyczyny ich powstania uważa się sztywny stan spiętrzonych naprężeń własnych (duża wartość ilorazu aksjatora do dewiatora naprężenia), zwiększoną wadliwość spoin w końcowych odcinkach oraz impulsy energetyczne podczas transportu lub montażu typu wstrząsów lub uderzeń [12].

Prawie regularne przesuwanie się miejsc inicjowania pęknięcia nr 1 – od środka panelu na osi symetrii przesuła do narożnika panelu przy podporze – występuje wtedy, gdy szyna podsuwnicowa jest nieprzerwana na całej długości. W takiej sytuacji rozkład sił docisku pasa do środka ustala się jak w przypadku belki nieskończenie długiej, o przekroju pasa i szyny, leżącej na sprężystej półnieskończonej tarczy sprężystej (środnika). Krzywoliniowy rozkład membranowych sił docisku $p(x)$ kN/m, pod siłą skupioną F_z , wyznacza się ze wzoru Broudego [9]. W praktyce projektowej stosuje się równomierny rozkład odcinkowy naprężeń σ_z , o wartości równej naprężeniu maksymalnemu w rozkładzie krzywoliniowym (w osi siły nacisku pionowego). Długość odcinka efektywnego dla równomiernych naprężeń σ_z wynosi l_{eff} przy czym:

$$l_{eff} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{J_f / t_w} \quad (2)$$

gdzie: J_f jest sumą momentów bezwładności szyny i pasa względem ich własnych osi ciężkości w przypadku połączenia rozbiernego.

Długość strefy docisku przy rozkładzie krzywoliniowym jest 2,6 razy większa od długości efektywnej.

Analizy zmęczeniowe

Równomiernie rozłożone naprężenia docisku, które wynoszą:

$$\sigma_z = F_z / (t_w \cdot l_{eff}) \quad (3)$$

implikują w środku belki podsuwnicowej przyrosty $\Delta\sigma_z$ i $\Delta\tau_{xz}$ odpowiednio do naprężeń elementarnych w przekroju poprzecznym belki, tzn. do naprężenia σ_x od działania momentu zginającego M i do naprężenia τ_{xz} od działania si-

ły poprzecznej V (kierunki osi układu współrzędnych pokazano na rysunku 2). W obliczeniach można założyć [11], że:

$$\Delta\sigma_x = 0,25 \sigma_z \quad \Delta\tau_{xz} = 0,30 \sigma_z \quad (4)$$

W analizie zmęczeniowej środka należy uwzględnić działanie naprężeń od skupionego momentu skręcającego M_s , wywołanego zarówno przez mimośrodkowe ustawienie pionowego F_z i poziomego H_y nacisku koła na główkę szyny. Od działania skupionego momentu skręcającego M_s powstają naprężenia normalne w kierunku pionowym $\sigma_{z,M}$ oraz naprężenia styczne $\tau_{xz,M}$, które wynoszą:

$$\begin{aligned} \sigma_{z,M} &= M_s \cdot a \cdot t_w / (0,7 \cdot J_f \cdot h_w), \\ \tau_{xz,M} &= 0,25 \cdot \sigma_{z,M} \end{aligned} \quad (5)$$

zaś moment skręcający oblicza się ze wzoru:

$$M_s = F_z \cdot e_F + H_y \cdot e_H \quad (6)$$

We wzorach (5) i (6) wprowadzono oznaczenia: e_F – mimośrodek siły F_z względem płaszczyzny środkowej środka; $e_H = 3/4$ wysokości szyny; a – rozstaw żeber poprzecznych środka blachownicy; h_w – wysokość środka.

W miejscu inicjowania się pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni zewnętrznej środka przy jego krawędzi górnej nie może dojść do uplastycznienia materiału, czyli musi być spełniony warunek Hubera-Misesa-Hencky'ego:

$$\sqrt{(\sigma_x + \Delta\sigma_x)^2 + (\sigma_z + \sigma_{z,M})^2 - (\sigma_x + \Delta\sigma_x) \cdot (\sigma_z + \sigma_{z,M})} + \sqrt{3 \cdot (\tau_{xz} + \Delta\tau_{xz} + \tau_{xz,M})^2} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (7)$$

oraz nie może być przekroczona wytrzymałość, przy której główne naprężenia styczne τ_G inicjują rysę zmęczeniową. Z pewnym zapasem bezpieczeństwa można przyjąć, że zakres zmienności głównych naprężeń stycznych $\Delta\tau_G$ nie powinien być większy od zakresu wytrzymałości trwałej dla naprężeń stycznych $\Delta\tau_L = 37$ MPa. Zatem drugi warunek obliczeniowy w tym samym miejscu sprawdzania wytrzymałości środka ma postać [11]:

$$\sqrt{(\sigma_x + \Delta\sigma_x - \sigma_z - \sigma_{z,M})^2} + \sqrt{4 \cdot (\tau_{xz} + \Delta\tau_{xz} + \tau_{xz,M})^2} \leq \Delta\tau_L / \gamma_{M1} \quad (8)$$

Wytrzymałość środka na inicjowanie niskocyklowych pęknięć zmęczeniowych można uważać za wystarczającą, gdy równocześnie będą spełnione warunki (7) i (8).

Podsumowanie

W blachownicowych belkach podtorzy suwnic i przenośników rewersyjnych węgla w elektrowniach zdarzają się przypadki poważnych awarii podtorzy, rozpoczynające się od pęknięć zmęczeniowych środków tych belek. Zagadnienie przyczyn inicjowania i propagacji takich pęknięć zmęczeniowych jest złożonym zadaniem wieloparametrowym. Przedstawione w artykule propozycje analiz tych zagadnień mogą być pomocne w praktyce.

Literatura

- [1] Kikin A. I. i inni, Zwiększenie żywotności metalowych konstrukcji budynków przemysłowych, Strojizdat, Moskwa 1984 (w jęz. ros.).
- [2] PN-EN 1991-3. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 3: Oddziaływania wywołane przez pracę dźwigów i maszyn.
- [3] Kawecki P., Kawecki W., Łaguna J., Ocena zmęczenia stalowych belek podsuwnicowych na podstawie PN-EN 1993-6 i PN-EN 1993-1-9, Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2010, ss. 11÷17.
- [4] Bródka J., Zachowanie się konstrukcji stalowych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
- [5] Maeda Y. and Okura I., Influence of initial deflection of plate girder webs on fatigue crack initiation, Engineering Structures, Vol. 5, January 1983, pp. 58÷66.
- [6] Juszkiewicz W. N., Obliczenia na zmęczenie połączenia środka z pasem w belkach podsuwnicowych od lokalnego działania kół jezdnych, Prace Leningradzkiego Politechnicznego Instytutu im. M. I. Kalinina, No 329, 1972, ss. 5÷12 (w jęz. ros.).
- [7] Gurney T. R., Zmęczenie konstrukcji spawanych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [8] Rykałuk K., Hotała E., Przyczyny awarii stalowych belek podtorza przenośnika rewersyjnego, Materiały XXII Konferencji naukowo-technicznej Awary Budowlane, Szczecin – Międzyzdroje, 17-20 maja 2005, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, ss. 755 – 762.
- [9] Broude B. M., Rozkład nacisku skupionego w belkach stalowych, Strojizdat, Moskwa-Leningrad 1950 (w jęz. ros.).
- [10] Toprac. A. A., Fatigue strength of hybrid plate girders, Journal of the Structural Division of the Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST 4, 1971, pp. 1203÷1225.
- [11] Bałdin W. A., Gorpichenko W. M., Rasczot na wynosliwość" wierzchniej zony stienki podkranowej bałki, Stroitielnaja mechanika i rasczot sooruzenij, No 4/1976, ss. 34-38.
- [12] Chajutin I. Ł., Powstawanie pęknięć spawalniczych w środkach stalowych belek podsuwnicowych, Budownictwo Przemysłowe No 9/1974, ss. 43÷44 (w jęz. ros.).