

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



**mgr inż. Krzysztof Marcinczak**  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska

Koło suwnicy, które przejeżdża po główce szyny jezdnej, wywołuje w górnej części środka belki podsuwnicowej lokalne naprężenia ściskające  $\sigma_z$  oraz ścinające  $\tau_{xz}$  (rys. 1.) niezależnie od naprężeń globalnych. Normy PN-EN 1993-6:2009 [1] oraz PN-B-03200:1990 [2] podają wytyczne dla określenia wartości lokalnych naprężeń tylko w sytuacji przejazdu koła suwnicy po szynie ciągłej.

W artykule przedstawiono analizy numeryczne, na podstawie których przeanalizowano wartości lokalnych naprężeń ściskających w środku pod różnymi stykami szyn dla dwóch przypadków połączenia szyny jezdnej z pasem górnym belki podsuwnicowej – połączenie podatne (wzajemnie przesuwne) oraz ułożenie szyny na elastycznej taśmie. Analizowane zagadnienie jest istotne z punktu widzenia trwałości belek podsuwnicowych, ponieważ styk szyn to miejsce, gdzie często dochodzi do inicjowania pęknięć zmęczeniowych, które są powodem awarii belek podsuwnicowych [3], [5].

**Podejście analityczne wg (1)**

Według [1] do obliczenia wyężenia środka przyjmuje się naprężenia ściskające, równomiernie rozłożone na długości  $L_{eff}$  (rys. 1.):

$$\sigma_{0z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{L_{eff}} \left(1 - \frac{2z}{h_w}\right) \quad (1)$$

$$L_{eff} = l_{eff} + 2z \quad (2)$$

gdzie:

- $F_{z,Ed}$  – wartość obliczeniowa pionowego oddziaływania koła suwnicy,
- $t_w$  – grubość środka,
- $h_w$  – wysokość środka,
- $z$  – odległość rozpatrywanego poziomu środka od dolnej powierzchni pasa górnego.

# REDUKCJA NAPRĘŻEŃ W ŚRODKU BELKI POSUWNICOWEJ

W artykule przedstawiono wpływ zastosowania podkładki elastycznej pod szyną jezdnią na wartość lokalnych naprężeń ściskających w środku stalowej belki podsuwnicowej.

Efektywną długość  $L_{eff}$ , na której przyjmuje się równomierny rozkład naprężeń, można wyznaczyć według tablicy 1. [1] (z uwzględnieniem zużycia szyny odpowiadającego 25% minimalnej grubości tr główki szyny).

**Podejście analityczne wg (2)**

Według PN-B-03200:1990 [2] wysokość szyny i grubość środka ma bezpośredni i zasadniczy wpływ na wartość naprężeń lokalnych występujących w środku pod siłą skupioną od koła suwnicy. Na rys. 2. przedstawiono schematycznie szerokość strefy docisku  $c_0$ , przez którą przekazywane jest obciążenie na środek.

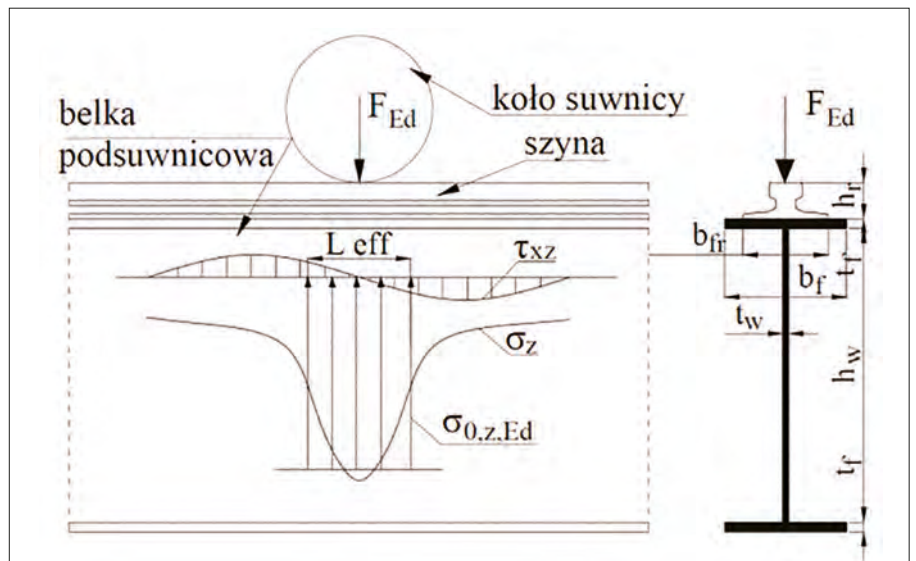
Wartość maksymalnych naprężeń ściskających w środku ostatecznie wyznacza się wg wzoru:

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{C_0 t_w} \quad (3)$$

gdzie:

- $c$  – szerokość docisku koła suwnicy,
- $d_0$  – wysokość główki szyny,
- $d$  – wysokość szyny,
- $c_0$  – szerokość równomiernego rozkładu naprężeń,
- $F_{Ed}$  – wartość obliczeniowa oddziaływania pionowego koła suwnicy,
- $t_w$  – grubość środka,
- $c$  – szerokość, na której przyjmuje się równomierny nacisk koła suwnicy.

To podejście normowe jest mniej precyzyjne w stosunku do procedury w [1] i nie uwzględnia



Rys. 1. Rozkład lokalnych naprężeń występujących w środku belki podsuwnicowej pod naciskiem koła suwnicy

różnych sposobów połączenia szyny podsuwnicowej z belką podsuwnicową.

### Rozwiązanie

Wyznaczono lokalne naprężenia ściskające występujące w środku, wywołane oddziaływaniem koła na ciągłą szynę jezdnią wg procedur [1], [2]. Dokładny opis procedur i ich objaśnienia przedstawiono m.in. w [6] i [7]. Dane geometryczne przekroju belki podsuwnicowej dla analizowanego przykładu analitycznego przedstawiono na rys. 3b. Otrzymane wyniki analityczne zestawiono w tablicach 2. oraz 3. W tablicy 2. zestawiono  $I_{f,eff}$  – moment bezwładności przekroju pasa belki o szerokości efektywnej  $b_{eff}$  względem własnej osi poziomej,  $I_r$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego szyny (pomniejszonego o zużycie) względem własnej osi poziomej,  $l_{eff,prz}$  – długość efektywną dla przesuwego połączenia szyny jezdnej z pasem belki podsuwnicowej,  $\sigma_{0,z,Ed,prz}$  – maksymalną wartość lokalnych naprężeń ściskających dla przypadku przesuwego połączenia szyny jezdnej z pasem belki podsuwnicowej,  $l_{eff,pod}$  – długość efektywną dla sytuacji, w której szyna jest ułożona na podkładce elastycznej o grubości 6 mm,  $\sigma_{0,z,Ed,pod}$  – maksymalną wartość lokalnych naprężeń ściskających dla przypadku, w którym szyna jest ułożona na podkładce elastycznej o grubości 6 mm.

Dla rozpatrywanego przykładu analitycznego długość efektywna w sytuacji połączenia

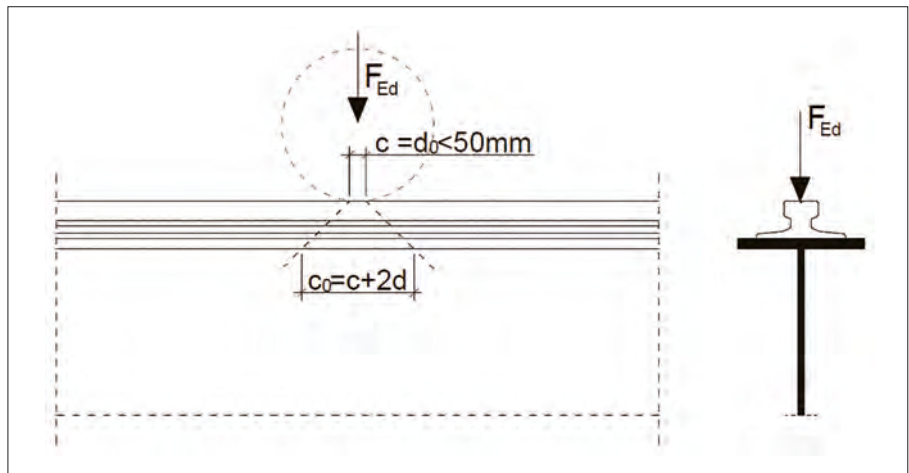
Zastosowanie podkładki powoduje, że wzrost lokalnych naprężeń ściskających pod stykiem szyn jezdnych jest redukowany.

podatnego szyny jezdnej z pasem górnym belki podsuwnicowej wyniosła 0,192 m, z kolei dla przypadku ułożenia szyny jezdnej na podkładce elastycznej 0,251 m. Różne długości efektywne determinują różne wartości lokalnych, maksymalnych naprężeń ściskających. Dla połączenia podatnego  $\sigma_{0,z,Ed,prz} = 43,52$  MPa, dla sytuacji z podkładką sprężynującą  $\sigma_{0,z,Ed,prz} = 33,20$  MPa.

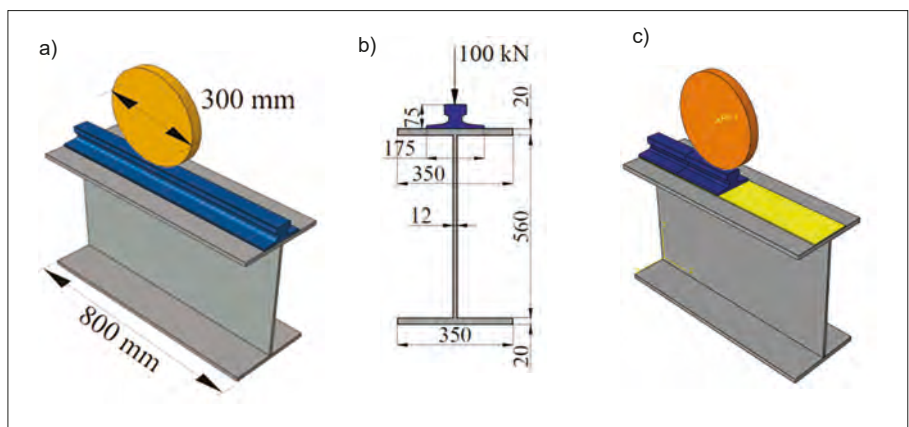
Procedura wg [2] nie uwzględnia rozróżnionych przypadków połączenia szyny jezdnej z pasem górnym belki podsuwnicowej. Według tej procedury szerokość efektywna wynosi 0,183 m, a maksymalna wartość lokalnych naprężeń ściskających  $\sigma_{z,Ed} = 45,54$  MPa.

### Analizy numeryczne

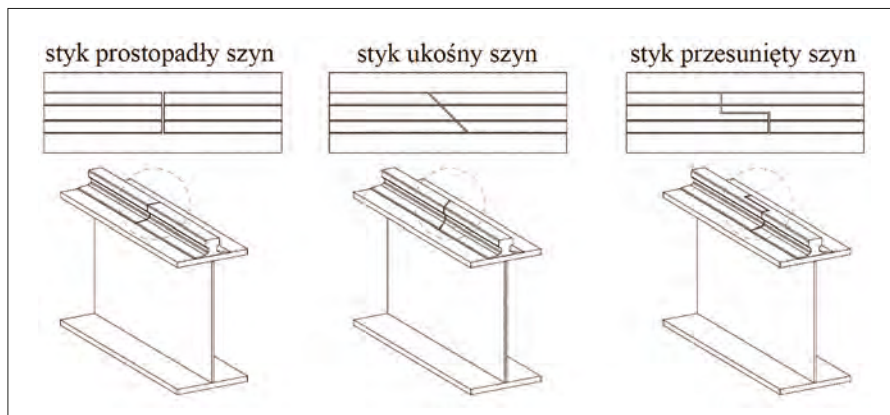
Na potrzeby analiz zbudowano w programie ABAQUS 6.14-2 [4] (rys. 3.) dwanaście modeli numerycznych wycinka stalowej belki o długości 800 mm wraz z szyną jezdnią (typ SD75). W ośmiu modelach dodatkowo zamodelowano podkładkę elastyczną pomiędzy szyną a pasem górnym belki podsuwnicowej. Przyjęto grubość podkładki równą 6 mm. Przeanalizowano



Rys. 2. Szerokość równomiernego rozkładu naprężeń w środku od reakcji koła suwnicy wg [2]



Rys. 3. Model numeryczny: a) widok w programie ABAQUS z szyną ciągłą, b) przekrój poprzeczny belki podsuwnicowej i szyny jezdnej wraz z wymiarami, c) widok belki podsuwnicowej z podkładką



Rys. 4. Analizowane styki stosowane w szynach podsuwnicowych

wano sytuację przejazdu koła po ciągłej szynie jezdnej oraz sytuację przejazdu koła przez trzy najczęściej stosowane styki szyn jezdnych – styk prostopadły, ukośny i przesunięty (rys. 4.). Przyjęto rozwarście styku 2 mm.

Obciążenie zamodelowano jako koło suwnicy poruszające się po szynie i wywołujące obciążenie pionowe 100 kN. Modele obliczeniowe zbudowano z elementów SOLID typu C3D8R

[4]. Zamodelowano dwa rodzaje połączenia szyny jezdnej z pasem górnym belki podsuwnicowej (połączenie wzajemne przesuwne i ułożenie szyny na podkładce elastycznej). W modelu przyjęto materiał elementów stalowych o charakterystyce sprężysto-plastycznej i parametrach wytrzymałościowych jak dla stali S355. Dla podkładki elastycznej przyjęto dwa materiały o różnych modułach sprężysto-

Tablica 1. Efektywna długość strefy obciążenia  $l_{eff}$  [1]

| Opis przypadku   | Długość efektywna   |
|--|---|
| Sztywne (nieprzesuwne) połączenie szyny z pasem belki podsunwicznej                    | $l_{eff} = 3,25 \sqrt[3]{\frac{I_{rt}}{t_w}}$             |
| Podatne (wzajemnie przesuwne) połączenie szyny z pasem belki podsunwicznej             | $l_{eff} = 3,25 \sqrt[3]{\frac{I_{rt} + I_{r,eff}}{t_w}}$ |
| Ułożenie szyny jezdnej na elastycznej taśmie sprężynującej o grubości co najmniej 6 mm | $l_{eff} = 4,25 \sqrt[3]{\frac{I_{rt} + I_{r,eff}}{t_w}}$ |

Oznaczenia:

$I_{rt}$  – moment bezwładności względem osi poziomej przekroju współpracującego, złożonego z przekroju poprzecznego szyni i przekroju pasa belki o szerokości efektywnej,

$I_{r,eff}$  – moment bezwładności przekroju pasa belki o szerokości efektywnej  $b_{eff}$  względem własnej osi poziomej,

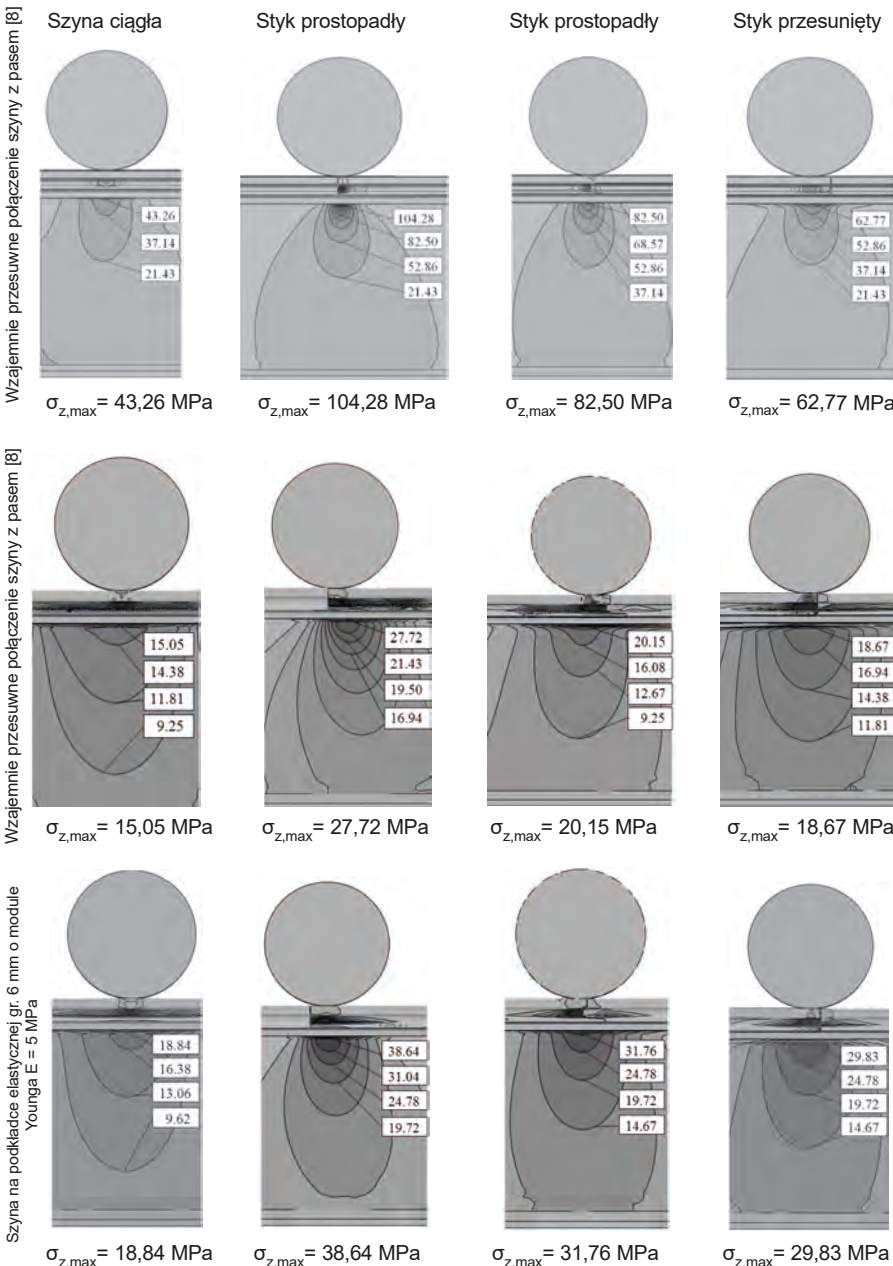
$I_r$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego szyny (pomniejszonego o zużycie) względem własnej osi poziomej,

$b_{eff}$  – szerokość efektywna pasa belki,  $b_{eff} = b_r + h_r + t_s \leq b_r$ ,

$h_r$  – wysokość szyny,

$b_r$  – szerokość stopki szyny.

Tablica 4. Mapy lokalnych naprężeń ściskających rozpatrywanych przypadków



Materiał, z jakiego wykonana jest podkładka elastyczna (materiały o różnych modułach Younga), ma wpływ na wartość redukcji analizowanych naprężeń. Im sztywniejsza podkładka, tym redukcja lokalnych naprężeń ściskających jest mniejsza.

ści 5 MPa i 25 MPa oraz współczynnika Poissona 0,45. W celu uproszczenia analiz podkładkę elastomerową zamodelowano o przekroju prostokątnym bez wyprofilowań.

Zamodelowanie toczenia się koła pozwoliło określić najbardziej niekorzystne usytuowanie koła suwnicy. W tabelicy 3. zestawiono mapy naprężeń dla położenia koła suwnicy, które powoduje wystąpienie maksymalnych wartości lokalnych naprężeń ściskających. W stykach ukośnym i przesuniętym maksymalną wartość lokalnych naprężeń zaobserwowano w osi szczeliny pomiędzy szynami, natomiast w styku prostopadłym wartość maksymalna występuje podczas nacisku koła na koniec jednej z szyn. Na podstawie tabelicy 4. można zaobserwować, że zastosowanie podkładki elastycznej pod szyną jezdną zdecydowanie redukuje wartość lokalnych naprężeń ściskających dla każdego z rozpatrywanych przypadków. Przejazd koła suwnicy po szynie jezdnej bez zastosowania podkładki elastycznej był analizowany m.in. w [7].

**Podsumowanie i wnioski**

Wartość maksymalnych naprężeń dla przypadku szyny ciągłej połączonej w sposób podatny z pasem górnym belki podsunwicznej wykazuje dużą zbieżność z wynikami analitycznymi. Wartość lokalnych naprężeń ściskających uzyskanych na podstawie obliczeń analitycznych dla sytuacji ułożenia szyny na podkładce elastycznej wykazuje rozbieżności – wartość analityczna jest o ok. 150% większa od wartości uzyskanych z analiz numerycznych. Uzyskany wynik analityczny jest po stronie bezpiecznej. Może to wynikać z tego, że wzory analityczne nie uwzględniają wpływu grubości podkładki i różnych materiałów, z jakich może być wykonana podkładka elastyczna.

Przedstawione analizy wykazują, że zastosowanie podkładki elastycznej redukuje wartości naprężeń ściskających dla każdego z analizowanych przypadków – wg analiz analitycznych (tab. 1.) redukcja wynosi ok. 25%, wg analiz numerycznych (tab. 4.) ok. 60%. Podobne rezultaty uzyskał w analizach numerycznych Maas [9]. Należy jednak podkreślić, że m.in. wg [3], [9] zastosowanie podkładki elastycznej nie wywołuje wyłącznie pozytywnych efektów – powoduje zwiększenie ugięcia szyny jezdnej i zwiększenie naprężeń rozciągających od zginania w szynie jezdnej. Zastosowanie podkładki elastycznej ma wpływ na tłumienie dynamicznego oddziaływania suwnicy oraz wygłusza przejazd



Tablica 2. Zestawienie wyników obliczeń analitycznych wg [1]

| $l_{r,eff}$<br>[m4]   | $l_r$<br>[m4]         | $l_{eff,prz}$<br>[m] | $\sigma_{0,z,Ed,prz}$<br>[MPa] | $l_{eff,pod}$<br>[m] | $\sigma_{0,z,Ed,pod}$<br>[MPa] |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| $1,733 \cdot 10^{-7}$ | $1,228 \cdot 10^{-6}$ | 0,192                | 43,52                          | 0,251                | 33,20                          |

Tablica 3. Zestawienie wyników obliczeń analitycznych wg [2]

| $c=d_n$<br>[m] | $d$<br>[m] | $c_n$<br>[m] | $\sigma_{z,Ed}$<br>[MPa] |
|----------------|------------|--------------|--------------------------|
| 0,033          | 0,075      | 0,183        | 45,54                    |

suwnicy po belce.

Podczas przejazdu koła suwnicy przez styk szyn jezdnych za każdym razem obserwujemy wzrost wartości lokalnych naprężeń ściskających w środku belki podsuwnicowej (tuż pod pasem górnym) w stosunku do przejazdu koła po szynie ciągłej. Największy wzrost uzyskano dla styku prostopadłego (ok. 100–150%), najmniejszy dla styku przesuniętego (ok. 25–50%). Zastosowanie podkładki powoduje, że wzrost lokalnych naprężeń ściskających pod stykiem szyn jezdnych jest redukowany.

Przedstawione analizy (tab. 4.) wykazały, że materiał, z jakiego wykonana jest podkładka elastyczna (materiały o różnych modułach Younga), ma wpływ na wartość redukcji analizowanych naprężeń. Im sztywniejsza podkład-

ka, tym redukcja lokalnych naprężeń ściskających jest mniejsza.

Zagadnienie wymaga dalszych badań i analiz w celu określenia wpływu grubości podkładki elastycznej oraz wpływu zastosowania żeber pionowych w środku na redukcję wzrostu naprężeń podczas przejazdu koła suwnicy przez styk szyn jezdnych.

#### Bibliografia

- PN-EN 1993-6:2009 – Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, cz. 6 Konstrukcje wsporcze dźwignic.
- PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe. Obliczenia i projektowanie.
- Biegus A.: Elastyczne połączenia konstrukcji wsporczej suwnic. Inżynieria i Budownictwo, 2013, nr 6, s. 295-299.
- Abaqus Online Documentation: Version 6.14.
- Rykaluk K., Hotala E.: Inicjowanie pęknięć zmęczeniowych w blachownicowych belkach podsuwnicowych. „Materiały Budowlane”, 2014, nr 5, s. 84-86.

dowlane”. 2014, nr 5, s. 84-86.

Zmuda J.: Konstrukcje wsporcze dźwignic. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.

Kucharczuk W., Labocha S.: Hale o konstrukcji stalowej. Poradnik projektanta. Polskie Wydawnictwo Techniczne, 2012.

Marcinczak K., Rowiński S.: Analizy numeryczne wpływu styku szyn na wartość lokalnych naprężeń ściskających w środku stalowych belek podsuwnicowych. Materiały Budowlane, 2016, nr 5, s. 103-104.

Maas G.: Investigations Concerning Craneway Girders. Iron and Steel Engineer, 1972, No.3.

Abstract. NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE THE ELASTOMERIC PAD OF LOCAL COMPRESSIVE STRESSES IN THE WEB OF STEEL CRANE BEAM. The paper presents the influence of the elastomeric pad on the value of local compressive stresses in the web of steel crane beam. The numerical analysis of crossing crane wheel through continuous rail and contact rails were presented. Two situation of connection the rail with the top flange were analyzed – crane rail not rigidly fixed to flange and crane rail mounted on the suitable resilient elastomeric bearing pad at least 6 mm thick. The standards form PN-EN 1993-1-1 and PN-B-03200:1990 were discussed. The analytical results were compared with the numerical results.

Keywords: crane beam, numerical analysis, steel structures

REKLAMA

**MOBILNE**  
laboratorium  
www.badaniaokien.pl

## BADANIA STOLARKI OTWOROWEJ ORAZ ŚCIAN OSŁONOWYCH W OBIEKTACH BUDOWLANYCH

Testy i badania wykonywane na budowie przeprowadzane w celu potwierdzenia wymaganych lub deklarowanych właściwości użytkowych.

Kontrola przeprowadzana przez ekspertów umożliwia:

- wczesne wykrycie ewentualnych błędów i usunięcie ich bez ponoszenia dodatkowych kosztów
- faktyczną kontrolę jakości wykonanych prac
- otrzymanie dokładnej dokumentacji dotyczącej jakości
- zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji
- skorzystanie z najnowocześniejszych metod inspekcji

Zakres badań:

- przepuszczalność powietrza okien, drzwi, fasad, szczeliny montażowej (wg metody laboratoryjnej)
- wodoszczelność z zastosowaniem komory ciśnieniowej (wg metody laboratoryjnej)
- wodoszczelność bez zastosowania komory ciśnieniowej (wg metody poligonowej)
- BlowerDoor Test - test szczelności powietrznej powłoki budynku
- pomiary termowizyjne
- pomiary izolacyjności akustycznej
- bezinwazyjny pomiar grubości wzmocnień stalowych
- pomiar współczynnika  $U_g$  szyb zespolonych za pomocą mobilnego urządzenia UGlass