

# Eksploatacja belek podsuwnicowych wykonanych ze stali zlewnej



dr inż.  
**JAN GIERCZAK**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0003-3219-1844



dr inż.  
**RAJMUND IGNATOWICZ**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0003-3663-0170



dr inż.  
**KRZYSZTOF MARCINCZAK**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0002-8789-5243

W artykule przedstawiono problematykę eksploatacji belek podsuwnicowych wykonanych ze stali zlewnej używanych od końca I wojny światowej, tj. ponad 100 lat. Na przestrzeni lat belki podsuwnicowe były modernizowane i wzmacniane w celu zainstalowania suwnic o większym udźwigu.

## Wstęp

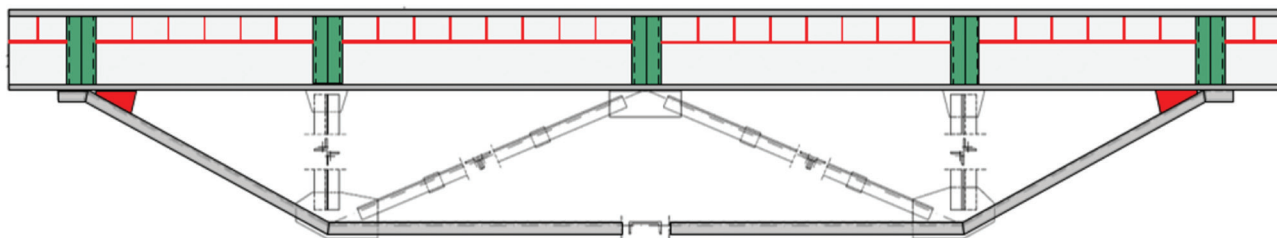
Rozpatrywany obiekt z belkami podsuwnicowymi był wzniesiony po I wojnie światowej, tj. w 1918 r. W kolejnych latach obiekt podlegał stopniowej rozbudowie w zależności od prowadzonych modernizacji linii technologicznych, produkcyjnych. Belki podsuwnicowe pierwotnie pracowały jako belki wolno podparte o rozpiętości 8,0 m. Wykonano je z profilu IPN 500 ze stali zlewnej. Belki te były rozbudowane pomostem roboczym, który usztywniał je na działanie sił poprzecznych. W latach 80. XX wieku istniejące belki podsuwnicowe zostały wzmacnione poprzez wytworzenie z ich udziałem układu kratowego, w których funkcję pasa górnego pełniły istniejące dotychczas samodzielnie belki podsuwnicowe z profilu IPN 500, a funkcję pasa dolnego pełniły nowo wykonane elementy z profilu C 200. Krzyżulce tych kratownic wykonano z profili walcowanych, tj. z kątowni-

ków równoramiennych  $2 \times L80 \times 80 \times 10$ . Pas dolny i krzyżulce zostały zamocowane do istniejącego pasa górnego IPN 500 poprzez spawane blachy węzłowe. Połączenia spawane wykonywano w warunkach eksploatacji obiektu, tj. w miejscu ich zamontowania. Musiało to skutkować wprowadzeniem dodatkowych odkształceń, a tym samym naprężeń wewnętrznych w istniejących elementach (wielkość i rozkład naprężeń spawalniczych jest uzależniony od kolejności układania spoin oraz prędkości ich wykonania). Kluczowymi czynnikami, które miały istotny wpływ na degradację całego materiału konstrukcyjnego belek, było wykonanie spoin w elementach znajdujących się pod obciążeniem oraz wprowadzenie miejscowego gradientu temperatury przy spawaniu, czyli wprowadzenie wymuszonych odkształceń termicznych [1, 3]. Wzmocnione w ten sposób belki podsuwnicowe by-

ły poddane eksploatacji pod nowymi suwnicami natorowymi o większym niż pierwotnie udźwigu. Wykonane wówczas połączenia spawane były obciążone licznymi niezgodnościami spawalniczymi i nie spełniały wymagań norm przedmiotowych, choćby ze względu na obciążenie cykliczne od suwnic. Połączenia, w których zastosowano spoiny pachwinowe w układzie prostopadłym do kierunku naprężeń głównych, nie kwalifikują się do przenoszenia obciążeń cyklicznych – zgodnie z normą PN-EN 1993-1-9 [8]. Dodatkowo belki podsuwnicowe zostały wzmacnione przy zastosowaniu technologii spawania dodatkowych żeber. W ramach wzmacnienia wykonano dodatkowe usztywnienia w postaci uźebrowania środka: żeberka podłużne oraz poprzeczne, dodano także blachę węzłową pomiędzy dwuteownikiem a ceownikiem w strefie przypodporowej. Wieloletnie modernizacje belek dopro-



Fot. 1. Widok ogólny na belki podsuwnicowe



Fot. 2. Schemat statyczny rozbudowanej belki podsuwnicowej

wadzały do stopniowej degradacji struktury stali w miejscach układania spoin na istniejących elementach konstrukcyjnych wytworzonych ze stali zlewnej obciążonych cyklicznie rosnącymi siłami od suwnic.

### Badania materiałowe

Badania materiałowe [4] istniejących belek podsuwnicowych wykonano w akredytowanym laboratorium we Wrocławiu. Próbkę pobrano z elementu toru jezdni suwnic, ze środka dwuteownika IPN 500 w miejscu występowania żebra poprzecznego i podłużnego oraz z elementu toru jezdni suwnic, z półki dolnej dwuteownika walcowanego. Z przeprowadzonych badań wynika, że w materiale pobranym zaobserwowano podłużne, wewnętrzne pęknięcia umiejscowione pod złączeniem w połowie grubości oraz poza obszarem złącza. Typ oraz charakter złącza świadczą o pęknięciach lamelarnych, rozwarstwiających. Pęknięcia te są charakterystyczne dla grubych elementów ze stali wykazujących pasmowe rozłożenie wtrąceń metalicznych charakterystycznych dla stali zlewnych z okresu około 1918 r. Blacha ze środka dwuteownika ma mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną z wydzieleniami cementytu trzeciorzędowego na granicach ziaren. Mikrostruktura sprzyja rozwojowi pęknięć oraz obniża udarność stali. W strefie wpływu ciepła zaobserwowano mikrostrukturę ferrytyczną. Skład chemiczny stali nie odpowiada niestopowym stalom konstrukcyjnym obecnie stosowanym ze względu na wysoką zawartość siarki i fosforu.

Zlecono dodatkowe badania w Instytucie Metalurgii Żelaza z siedzibą w Gliwicach w celu określenia zawartości azotu w stali. Otrzymano wynik dla próbki pobranej ze

środku IPN 500:  $177 \text{ ppm} \pm 16$  i  $118 \text{ ppm} \pm 15$  dla próbki pobranej z półki dolnej przekroju. Zgodnie z nieobowiązującą już normą PN-88/H-84020 zawartość azotu nie powinna przekraczać 0,010% dla stali półuspokojonych i uspokoionych oraz 0,012% dla stali wytapianych w piecach elektrycznych.

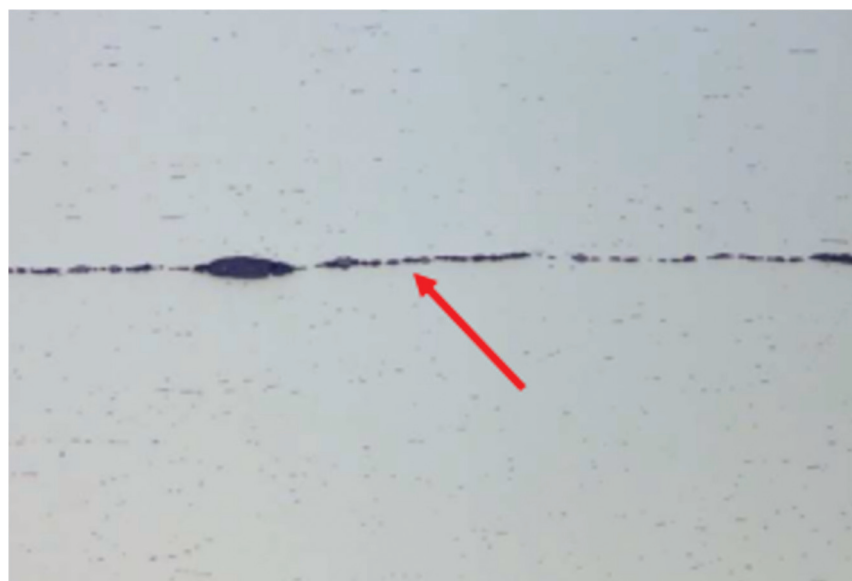
Zawartość azotu w badanych elementach nie spełnia dzisiejszych wymagań normowych. Azot jest odpowiedzialny za obniżenie udarności stali i powoduje starzenie się materiału. Starzenie materiału powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz obniża plastyczność, co jest zjawiskiem niekorzystnym przy obciążeniach cyklicznych i dynamicznych.

Przeprowadzone badania udarności wykazują niebezpiecznie niską jej wartość naj-

dującą się na poziomie  $7,5 \pm 1,2 \text{ J}$  – dla próbki pobranej z pasa profilu IPN 500 oraz  $5,9 \pm 0,9 \text{ J}$  – dla próbki pobranej ze środka profilu. Według obowiązujących norm udarność w temperaturze  $0^\circ\text{C}$  powinna wynosić 27 J. Warunek powyższy nie jest spełniony. Należy zaznaczyć, że większość historycznych obiektów inżynierskich tego warunku nie spełnia, ale wciąż są eksploatowane.

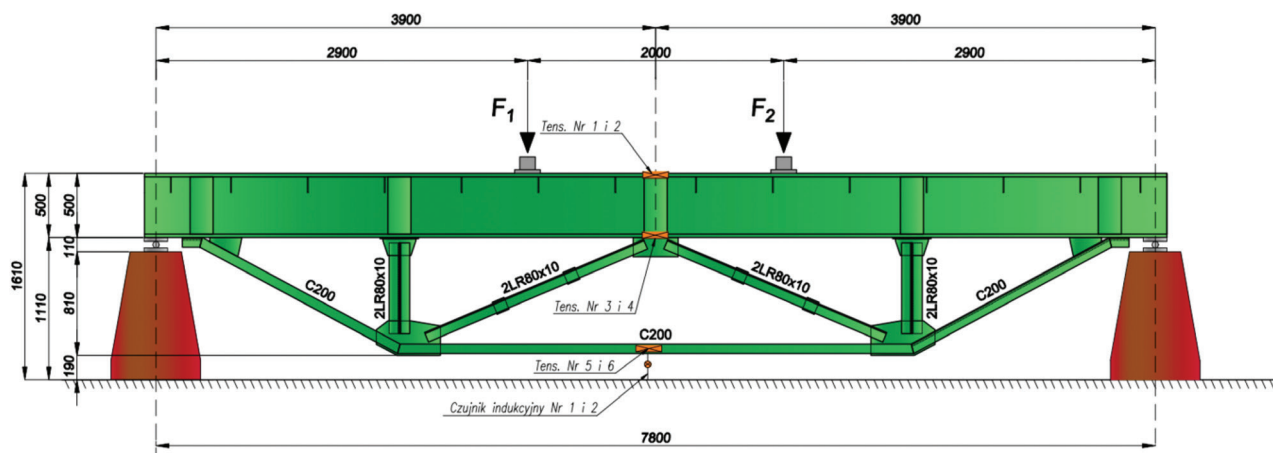
### Stan techniczny belki podsuwnicowej

Na podstawie przeprowadzonych wizji lokalnych oraz wykonanych badań laboratoryjnych stwierdzono także występowanie pęknięć lamelarnych przy spoinach wykonywanych w trakcie bieżących modernizacji, napraw oraz dostosowywania hali do nowych



Fot. 3 Pęknięcie lamelarne wzdłużne – patrz: czerwona strzałka. Stan nietrawiony, obraz mikroskopowy

Rozmieszczenie czujników indukcyjnych, tensometrów



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

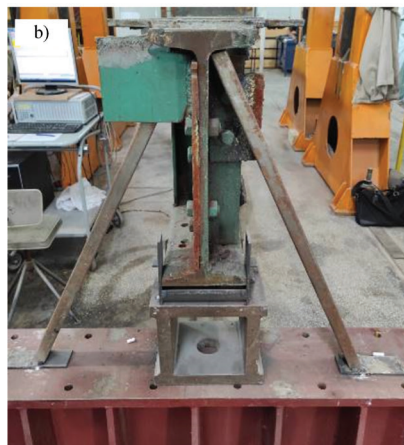
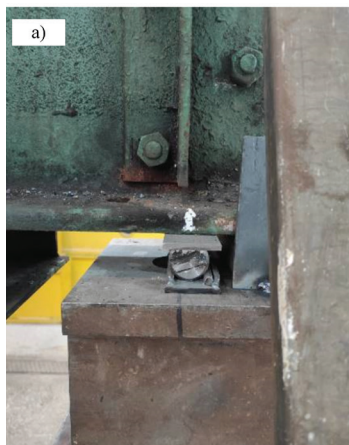
technologii.

Pęknięcie lamelarne występujące w konstrukcji powstało podczas spawania przy dostarczaniu ciepła potrzebnego do stopienia materiału [1, 3]. Pęknięcia te występują w złączach teowych, narożnych i krzyżowych.

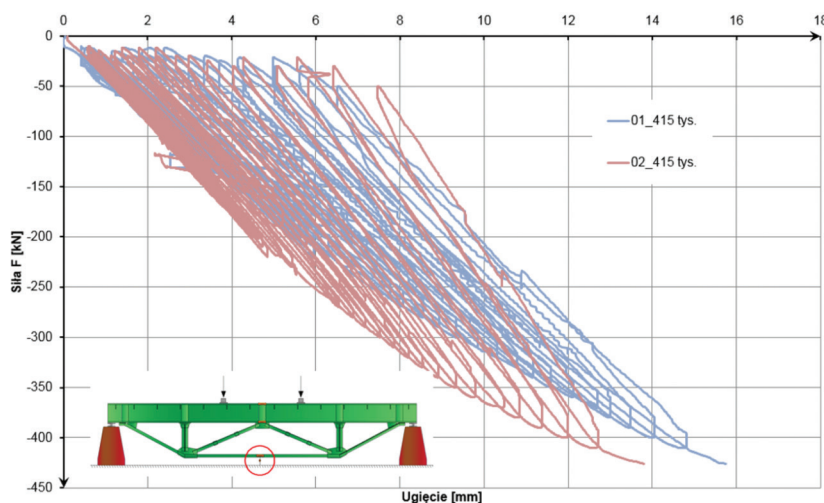
W istniejącej dokumentacji brak informacji co do typu użytych podczas spawania elektrod. W celu redukcji pęknięć lamelarnych właściwe byłoby użycie elektrod zasadowych o niższej wytrzymałości na rozciąganie niż ma materiał łączony oraz o znacznej wydłużal-

ności. Z drugiej jednak strony takie podejście jest niezgodne z przepisami normowymi, które nakazują stosowanie elektrod o wyższych parametrach wytrzymałościowych, niż mają łączone nimi elementy stalowe. Elektrody przed użyciem powinny zostać osuszone w celu zredukowania ilości dyfundującego wodoru. Równoważnik węgla CET stali powinien być większy niż równoważnik węgla dla spoiwa [4, 5, 6]. Złącza spawane powinny być właściwie przygotowane, tzn. powinien zostać zachowany właściwy odstęp od grani rowka, właściwa kolejność podgrzania i układania ściegów. Powinna także być zachowana minimalna temperatura wstępnego podgrzania elementu, którą bardzo ciężko uzyskać poza wytwórnią. Obecnie nie ma możliwości ustalenia, które z powyższych czynników znacząco wpłynęły na powstanie pęknięć lamelarnych, ponieważ nie ma zachowanych dzienników spawania.

Należy podkreślić, że pęknięcia lamelarne powstają przede wszystkim w stalach, które w wyniku dostarczania dużej ilości ciepła łatwo krystalizują się, zmieniając przy tym swoją strukturę – m.in. takie zjawisko fizyczne zachodzi w przypadku stali zlewnych [1, 3, 4].



Fot. 4. Detale stanowiska badawczego: a) widok łóżyska podporowego, b) widok przypór bocznych

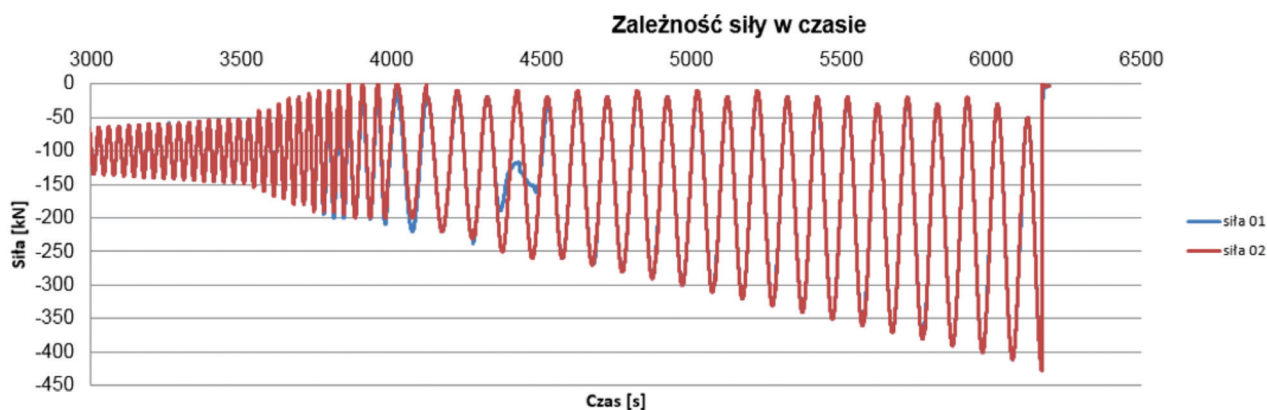


Rys. 3. Wykres zależności siły w funkcji ugięcia podczas pomiarów po 415 000 cyklach obciążenia do zniszczenia

### Badania cykliczne belek podsuwnicowych i analizy numeryczne

Projekt cyklicznych badań obciążeniowych wykonanych w Laboratorium Konstrukcji Budowlanych Politechniki Wrocławskiej został opracowany dla 2 elementów. Wstępne warunki brzegowe oraz procedury badawcze ustalono na podstawie wcześniejszych doświadczeń, analizy teoretycznej oraz możliwości sprzętu badawczego Laboratorium. Badania wykonano w skali naturalnej.

Z uwagi na wytworzenie podparcia belki rozpiętość zmniejszono do 7,8 m. Podparcie elementu zrealizowano przy wykorzystaniu łożysk wałkowych ustawionych na blachach stalowych (fot. 4a), w miejscu podparć belki



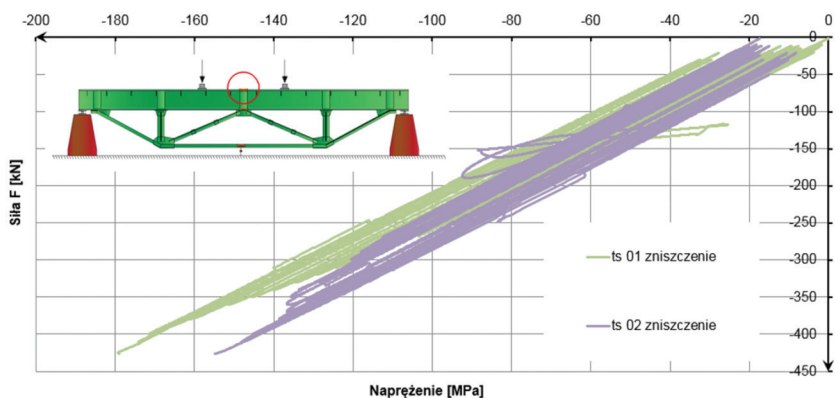
Rys. 2. Wykres zależności siły w czasie podczas pomiarów po 390 000 cyklach obciążenia

zastosowano boczne przypory zapewniające stateczność elementu podczas badań (fot. 4b). Obciążenie elementu było przykładane poprzez dwa siłowniki firmy Dynacell o maksymalnych naciskach równych 500 kN każdy. Siłowniki były rozstawione w odległości 2 m względem siebie.

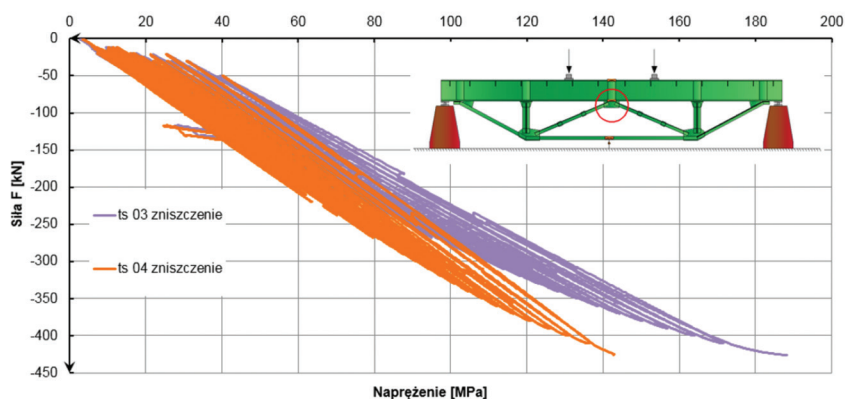
Urządzenia pomiarowe i siłowniki podłączono do Hottinger MGCPPlus w celu rejestracji wyników. Odkształcenia mierzono w środku rozpiętości belki na pasie górnym i dolnym dwuteownika oraz w pasie dolnym kratownicy wzmacniającej (rys. 1.). Zastosowano foliowe tensometry elektrooporowe typu RL 120/20 o bazie pomiarowej 20 mm i oporności 120.

Obciążenie do 390 tys. cykli wynosiło cyklicznie z częstotliwością 0,5 Hz od 0 kN do 2 x 50 kN. Po 390 tys. obciążenie zmieniło się z częstotliwością 0,3 Hz od 0 do 2 x 150 kN. Po 415 tys. cykli obciążenie zmieniło się z częstotliwością 0,3 Hz od 0 do 2 x 400 kN rosnąco aż do zniszczenia (rys. 2.). Obciążenie zwiększano ze względu na uzyskanie zniszczenia badanych belek. Na rys. 3. przedstawiono odczyty z czujników indukcyjnych służących do pomiaru ugięcia w środku rozpiętości elementu. Na rys. 4–6. przedstawiono wykresy naprężeń, których wartości uzyskano poprzez przemnożenie odczytów z tensometrów i wartości modułu Younga dla stali. Różnice w wartościach uzyskanych ugięć oraz naprężeń dla czujników znajdujących się w tym samym miejscu elementu, jednak po obu stronach przekroju poprzecznego belki były spowodowane dużym odkształceniem skrętnym belki podczas badań.

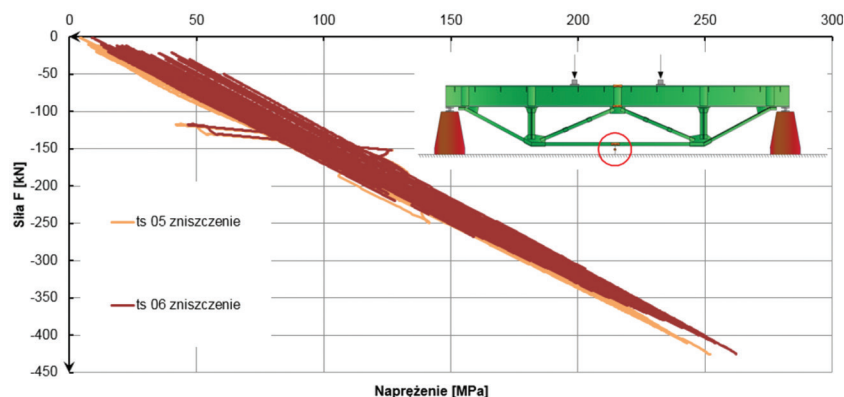
Z przeprowadzonych badań wynika, że pomimo długoletniej eksploatacji belek podsuwnicowych nie nastąpiła zdecydowana redukcja nośności belki na obciążenia zmęczeniowe. Belki nie straciły swojej zdolności do przenoszenia obciążeń cyklicznych i zachowały minimum 20% nośności zmęczeniowej. Przeprowadzone wzmocnienia belek na przestrzeni lat poprzez spawanie osłabiły zdolność przenoszenia obciążeń cyklicznych.



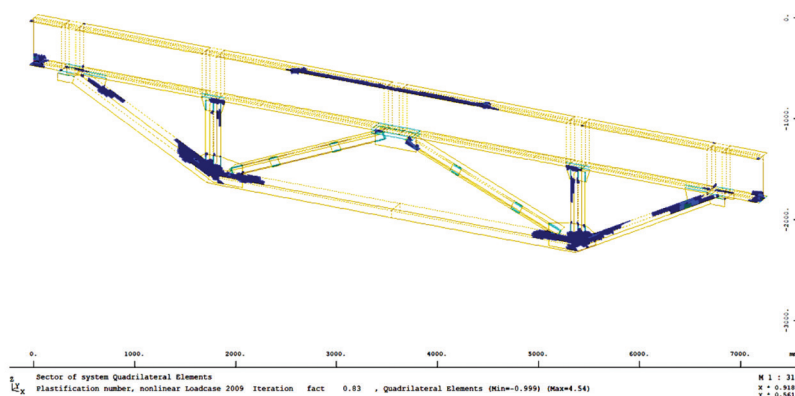
Rys. 4. Wykres naprężeń dla punktów pomiarowych na pasie górnym dwuteownika



Rys. 5. Wykres naprężeń dla punktów pomiarowych na pasie dolnym dwuteownika



Rys. 6. Wykres naprężeń dla punktów pomiarowych na pasie dolnym kratownicy wzmacniającej



Rys. 7. Propagacja deformacji plastycznych w ostatnim kroku obliczeniowym MES, przed wyczerpaniem nośności



Fot. 5. Pęknięcie spoiny pachwinowej przez żebrze poprzecznym w półce górnej IPN500



Fot. 6. Pęknięcie w materiale rodzimym w C200 w śródniku przy strefie wpływu ciepła

Przeprowadzono zaawansowane obliczenia numeryczne MES programem SOFiSTiK 2020. Model numeryczny [5, 6, 7] został zbudowany z elementów powłokowych oraz z więzi sztywnych i sprężystych. W obliczeniach zastosowano model sprężysto-

-plastyczny ze wzmocnieniem, przyjmując dane otrzymane z badań laboratoryjnych. Uzyskano ścieżki równowagi statycznej obciążenie – przemieszczenie zgodnie z wynikami przeprowadzonych badań. Na rys. 7. pokazano miejsca, które uplastyczniały się

przed wyczerpaniem nośności. Miejsca te występowały głównie na elementach nośnych, dospawanych, wykonanych ze stali St3S.

### Wnioski

Zniszczenie wykratowanych belek nastąpiło po 415 tysiącach cykli obciążenia. Belki były obciążane etapowo, najpierw siłą  $2 \times 50$  kN, a następnie siłą  $2 \times 150$  kN. W końcowej fazie badań siła wzrastała cyklicznie aż do wartości niszczącej  $2 \times 427$  kN. W ostatniej fazie zostały zauważone pęknięcia wzdłuż spoin pachwinowych w miejscu mocowania żebra poprzecznego belki zasadniczej – fot. 5. Na dalszym etapie zaczęły pojawiać się pęknięcia zmęczeniowe w elementach wzmacniających belkę zasadniczą (pas dolny kratownicy) – fot. 6–8. Należy zwrócić uwagę, że na obiekcie belka podsuwnicowa pracowała przy maksymalnym obciążeniu skupionym wielkości 160 kN od suwnicy większej i 80 kN od mniejszej suwnicy.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, analiz literaturowych oraz symulacji komputerowych stwierdzono, że belka podsuwnicowa po 100-letniej pracy zachowała swoją nośność zmęczeniową na poziomie nie mniejszym niż 20% swojej projektowanej żywotności, przy założeniach, w jakich belka pracowała na obiekcie.

Przeprowadzone modernizacje i wzmacnianie belek w trakcie ich eksploatacji z wykorzystaniem technik spawania osłabiły belkę podsuwnicową i obniżyły jej zdolność do przenoszenia obciążeń cyklicznych. Dodatkowo powstały pęknięcia lamelarne w wyniku spawania, które dodatkowo osłabiły element. W nawach, w których belki podsuwnicowe nie były wzmacniane, pracują i nie wymagają wzmocnień ze względu na obciążenia cykliczne [2].

Badana belka miała możliwość dalszej bezpiecznej pracy pod warunkiem niewzmacniania jej techniką spawania. Belki, które nie były poddane technice wzmacniania, mogą być dalej bezpiecznie eksploatowane. Stal zlewna przy nagraniu elementu krystalizuje się i zmienia swoją strukturę. Ze względu na występowanie azotu w stali zlewnej belka nie powinna być wzmacniana techniką spawania, gdyż zwiększa to kruchość materiału.

Biorąc pod uwagę, że przedmiotowe belki były projektowane metodą naprężeń dopuszczalnych (dla analizowanej stali wartość dopuszczalna to 120 MPa) z wykorzystaniem nośności na poziomie 70%, to naprężenia w nich nie przekraczały 84 MPa. Naprężenia te są mniejsze od wytrzymałości trwałej  $\Delta L=87,9$  MPa. Stąd płynie wniosek, że elementy wykonane ze stali zlewnej obciążone cyklicznie mogą pracować o wiele dłużej niż belki wykonane z obecnie do-

stępných gatunków stali. Spowodowane jest to większymi naprężeniami występującymi w belkach obecnie projektowanych, które przeważnie przekraczają 120 MPa, a nośność poszczególnych karbów nie jest uzależniona od granicy plastyczności.

#### Literatura

- [1] K. Rykaluk, E. Hotala, 2014, Inicjowanie pęknięć zmęczeniowych w blachownicowych belkach podsuwnicowych, „Materiały budowlane”, nr 501, s. 84–86.
- [2] PN-EN 1991-3:2009. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 3: Oddziaływania wywołane dźwignicami i maszynami.
- [3] T. Ładoga, P. Bitous, 2012, Jednoczesne uwzględnienie karbów geometrycznych i strukturalnych w złączu spawanym, „Modelowanie Inżynierskie”, nr 44, s. 179–186.
- [4] Lachowicz M., 2020, Badania materiałowe elementów nośnych konstrukcji suwnicy natorowej. Sprawozdanie z badań nr 200523/K/166 Machinefish Materials & Technologies sp. z o.o. sp. k.
- [5] Xiao Z.G., Yamada K., 2004, A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joint, Int. J. Fatigue, nr 26, s. 1277–1293
- [6] M. Kurek, T. Ładoga, 2012, Fatigue life estimation under cyclic loading including out-of-parallelism of the characteristics, Applied Mechanics and Materials, nr 104, s. 125–132.
- [7] T.R. Gurney, Zmęczenie konstrukcji spawanych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [8] PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-9: Zmęczenie.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8047

#### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Gierczak Jan, Ignatowicz Rajmund, Marcinczak Krzysztof, 2022, Eksploatacja belek podsuwnicowych wykonanych ze stali zlewnej, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8047

**Streszczenie:** Przedstawiono problematykę eksploataowania belek podsuwnicowych wykonanych ze stali zlewnej używanych od końca I wojny światowej tj. ponad 100 lat. Na przestrzeni lat belki podsuwnicowe były modernizowane i wzmacniane w celu zainstalowania suwnic o większym udźwigu. W okresie eksploatacji obiektu dokonywano modernizacji technologii produkcji, co wymuszało instalowanie większej liczby suwnic na istniejących belkach. W ostatnim czasie, w celu dalszej modernizacji zakładu produkcyjnego, belki podsuwnicowe wymieniono na nowe o lepszych parametrach wytrzymałościowych. Belki zdemontowane poddano badaniom cyklicznym w akredytowanym laboratorium Politechniki Wrocławskiej. Przedstawiono problematykę, z jaką musi się zmierzyć inżynier budownictwa przy ocenie i dopuszczeniu do dalszej eksploatacji konstrukcji wykonanej ze stali zlewnej.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje stalowe, belki podsuwnicowe, stal zlewna

#### Abstract: THE OPERATION OF CRANE GIRDERS MADE OF CAST STEEL.

The problem of operating crane girders made of cast steel in use since the end of the First World War, i.e. for over 100 years, is presented. Over the years, crane girders have been modernised and reinforced in order to install overhead travelling cranes with higher lifting loads. During the lifetime of the facility, production technology was modified, which



Fot. 7. Pęknięcie w materiale rodzimym w C200 przy strefie wpływu ciepła



Fot. 8. Pęknięcie spoiny pachwinowej przy blasze węzłowej na środniku C200

made it necessary to install more cranes on the existing beams. Recently, in order to further modernise the production plant, the crane beams were replaced with new ones with better strength parameters. The dismantled beams have been subjected to cyclic tests in an accredited laboratory of

the Wrocław University of Technology. The problems that a structural engineer has to face when assessing and admitting to further operation a structure made of stainless steel are presented.

**Keywords:** steel structures, crane girders, cast steel