ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 49 Nr kol. 1605

Artur BLUM

SPRĘŻANIE TECHNOLOGICZNE TRWALE ODKSZTAŁCONYCH SKRZYNKOWYCH DŹWIGARÓW MOSTOWYCH

Streszczenie. W referatach omówiono metodę sprężania technologicznego trwale odkształconych skrzynkowych dźwigarów mostowych wykorzystującej zjawisko skurczu spawalniczego spoin pachwinowych dodatkowych blach nakładkowych spawanych wzdłuż osi dźwigarów. Rezultat sprężenia jest analogiczny do operacji mechanicznej wywołującej ściskanie dźwigarów, której efektem jest przywrócenie ich pierwotnych wymiarów.

TECHNOLOGICAL PRESTRESSING PERMANENT DEFORMED OF THE BOX BRIDGE GIRDERS

Summary. In the paper are presented results of application the method of technological process of prestressing permanent deformed box girders.

The method consists in welding the additional straps along the length of girders and making use of the weld shrinkage phenomenon. The result of prestressed zone operation is analogous to the operation of compressing by the force. In the vicinity of the weld prestressed girder has been formed to its previous shape.

1. WSTĘP

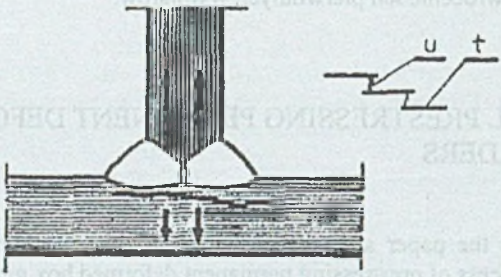
Od wielu już lat obserwuje się w konstrukcjach mostowych zjawisko występowania trwałych ugięć dźwigarów mostowych. Ocena przyczyn powstawania zjawiska trwałych odkształceń dźwigarów mostowych jest złożona. Związana jest bowiem zarówno z warunkami eksploatacji mostów, jak i technologią ich wykonania. Relaksacja naprężeń spawalniczych z okresu budowy przęseł mostowych ma istotne znaczenie dla procesu narastania trwałych ugięć dźwigarów, lecz nie jest czynnikiem decydującym. Równie istotnym czynnikiem są warunki eksploatacji mostów, ich przeciążenia ponad nośność projektową czy też procesy remontowe związane z procesem spawania konstrukcji.

W celu wyrównania jezdni mostowej użytkownicy decydują się często w przypadku mostów suwnicowych na zakładanie między szynę a pas górny dźwigarów nośnych stopniowanych blach podkładkowych, które poprawiają niwelatę toru jezdnego. Natomiast w przypadku trwale odkształconych mostów kolejowych wyrównanie niwelaty torów jezdnych

dokonuje się przez zakładanie podkładów kolejowych o zróżnicowanej wysokości, maksymalnej w środku konstrukcji zmniejszającej się w miarę oddalania się od osi mostu w kierunku podpór mostowych. Taki proces niewątpliwie poprawia warunki trakcyjne. lecz nie likwiduje zjawiska narastania trwałych ugięć dźwigarów mostowych.

Czynnikiem, który obserwuje się w ostatnich latach, wpływającym na przyrost trwałych ugięć dźwigarów jest rozwój pęknięć lamelarnych w blachach, z których wykonane są dźwigary mostowe.

Są to głównie blachy gorąco walcowane z gatunku St3S, które w swojej strukturze ferrytyczno–perlitycznej zawierają wtrącenia niemetaliczne, które dostające do stali podczas hutniczego procesu technologicznego. Udział wtrąceń niemetalicznych (SiO_2, Al_2O_3, MnO, MnS) w stali jest niewielki (0,02 ÷0,03%), jednak wtrącenia wpływają na własności stali w trakcie przeróbki plastycznej na gorąco. Niektóre z nich, głównie MnS, ulegają wydłużeniu w trakcie walcowania powodują włóknistą postać w strukturze. Obecność wtrąceń niemetalicznych jest przyczyną rozwarstwień blach w trakcie ich użytkowej eksploatacji jako elementów konstrukcyjnych w latach 70.-90. ubiegłego wieku zanotowano wiele przypadków pęknięć dźwigarów, których przyczynę stanowiły pęknięcia lamelarne blach. Nazwa powstała z uwagi na płytkowy obraz przełomu pęknięć jest odpowiednikiem określenia angielskiego „lamellar tearing" [1]. Stwierdzono, że pęknięcia lamelarne powstają na skutek dużych naprężeń skurczowych w złączach spawanych blach w kierunku prostopadłym do grubości blachy, co ilustruje rys. 1.

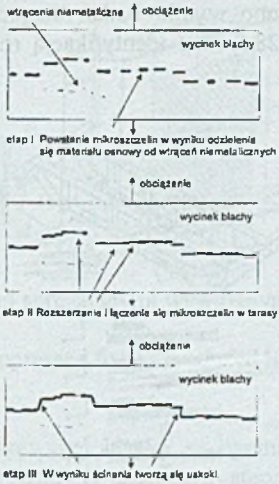


Rys.1. Typowe pęknięcia lamelarne w strukturze pasmowej; t- taras, u- uskok [1]
Fig.1. Typical lamellar fracture in strip structure; t-terrace, u-leap

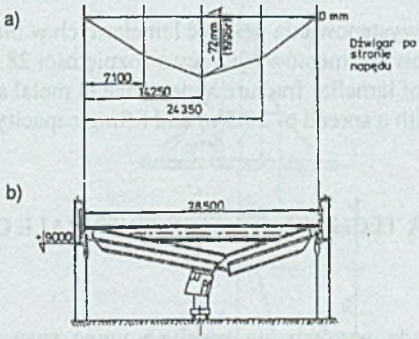
Na rysunku 2 przedstawiono etapowo mechanizm pękania lamelarnego.
Pękanie zachodzi w trzech etapach:

1. Na skutek oddzielenia materiału osnowy od poszczególnych wtrąceń niemetalicznych powstają mikroszczeliny równoległe do powierzchni walcowania stali.
2. Mikroszczeliny rozszerzają się i łączą ze sobą, tworząc tzw. tarasy.
3. W wyniku rozciągania blachy w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania stali powstają przejścia pomiędzy poszczególnymi tarasami.

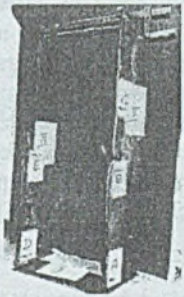
Etap pierwszy to okres inicjowania pękania lamelarnego, etap drugi i trzeci to okres rozprzestrzeniania się pękania aż do całkowitego zniszczenia (rozerwania).
Osłabienie struktury stali rozwijającym się procesem pękania lamelarnego uwidacznia się przyrostem trwałych ugięć konstrukcji mostowej, które wprowadzają kolejne stadia uszkodzenia w postaci pęknięcia dźwigarów. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów ugięć dźwigara napędowego mostu suwnicy o rozpiętości 31,5 m przed wystąpieniem pęknięcia katastroficznego 1996 r.



Rys.2. Przebieg pękania lamelarnego [1]
Fig.2. Lamellar fracture course

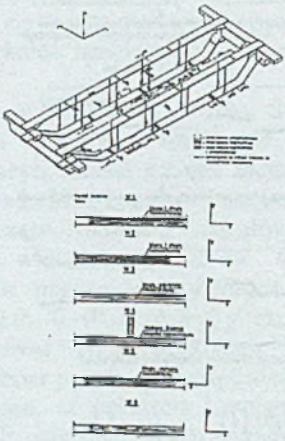


Rys. 3. a) Linia trwałego ugięcia dźwigara przed wystąpieniem pęknięcia katastroficznego,
b) lokalizacja pęknięcia dźwigara
Fig. 3. a) Line of permanent girder deflection before appearance catastrophic fracture
b) location of girder fracture



Rys.4. Zdjęcie przełomu złamanego dźwigara
Fig.4. Picture of broken girder fracture

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań diagnostycznych blach pasa dolnego dźwigara suwnicy o rozpiętości 28,5 m z identyfikacją rozwarstwień blachy na długości dźwigara.



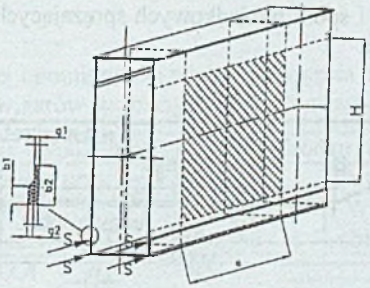
Rys. 5. Ilustracja graficzna występowania pęknięć lamelarnych w blachach pasa dolnego dźwigarów skrzynkowych mostów suwnicy o rozpiętości 28.5 m i udźwigu 30 t

Fig. 5. Graphic illustration of lamellar fracture appearance in metal sheet of bottom flange of box girder bridge with a spread of 28.5 m and lifting capacity 30 t

2. METODA SPRĘŻANIA TECHNOLOGICZNEGO TRWALE ODKSZTAŁCONYCH DŹWIGARÓW

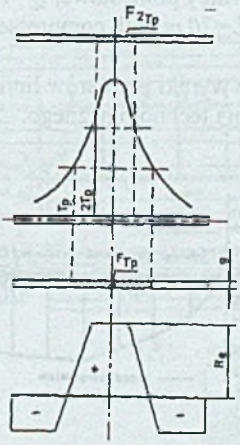
Przedstawiona metoda wyrównania trwałych ugięć spawanych dźwigarów została zweryfikowana na kilkunastu mostach o zróżnicowanej długości, które charakteryzowały się trwałymi ugięciami o zakresie 40 – 100 mm strzałki ugięcia. Polega na przyspawaniu do strefy dolnej dźwigara (rozciąganej od obciążeń użytkowych i ciężaru własnego) dodatkowych blach nakładkowych w oparciu o oryginalną technologię spawania chronioną patentem [2]. Przyspawanie do strefy dolnej dźwigara blach nakładkowych równolegle do osi dźwigara związane jest z wprowadzeniem spawalniczego skupionego źródła ciepła powodując nagrzanie lokalne w strefie spoiny części materiału dźwigara przy nieznacznym zwiększeniu temperatury pozostałej części dźwigara. Przy temperaturach około 600^{0}C granica plastyczności materiału gwałtownie się obniża i siły sprężystego oddziaływania otaczającego materiału powodują ściskanie strefy oddziaływania termicznego spoiny.

Kolejne stadium chłodzenia blachy nakładkowej i spoin wiążących ją z materiałem środnika i powoduje skurcz termiczny w tej strefie uplastycznienia, co jest analogiczne do działania sił sprężających ściskających dźwigar (rys. 6).



Rys. 6. Dźwigar obciążony siłami sprężającymi wywołanymi skurczem spawalniczym spoin nakładek bocznych
Fig. 6. Girder weighted with compressed forces produced by welding shrinkage of side strap weld

Odkształcenia termiczne nagrzewanej blachy są ograniczone przez otaczający materiał, który nie został nagrzany lub nagrzany w mniejszym stopniu. W wyniku nagrzania do temp. T_p naprężenia ściskające w blachach nakładkowej i pasa dolnego osiągną granicę plastyczności R_{et} [1].

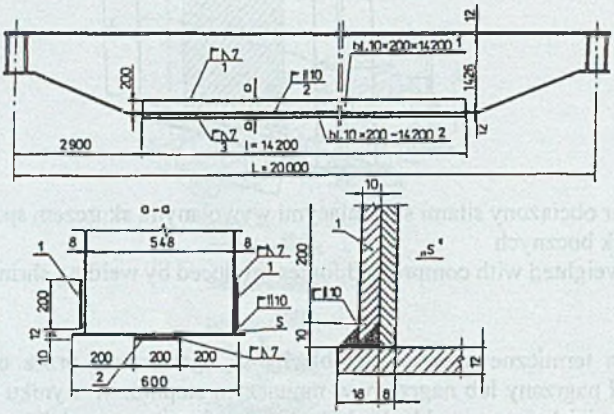


Rys. 7. Diagram rozkładu naprężeń spawalniczych w strefie blachy nakładkowej i pasa dolnego po ochłodzeniu układu do 0^0C [4]
Fig. 7. Diagram of stress pattern in area of strap metal sheet and bottom flange after cooling down the system to 0^0C

3. PRZYKŁADY TECHNICZNEJ REALIZACJI SPRĘŻANIA TECHNOLOGICZNEGO DŹWIGARÓW

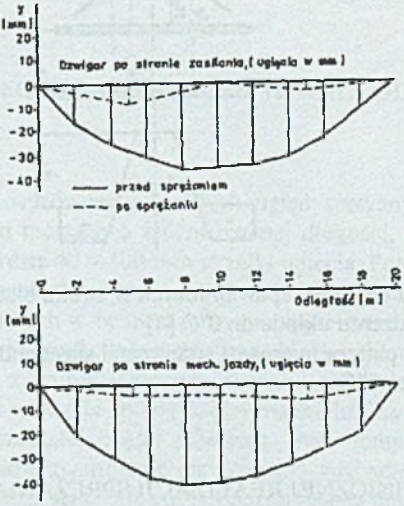
Jak już wspomniano, metoda została zastosowana w odniesieniu do kilkunastu wielkogabarytowych mostowych dźwigarów skrzynkowych, których ugięcie trwałe przekraczające wartość $\frac{3,5}{1000}$ rozpiętości powodowało samotoczenie się wózków po jezdni uniemożliwiające bezpieczną ich eksploatację. Przykładowo na rys. 8 przedstawiono dźwigar

skrzynkowy z opisem blach i spoin nakładkowych sprężających technologicznie konstrukcję trwale odkształconego mostu.



Rys.8. Dźwigar skrzynkowy suwnicy pomostowej $Q=7t$, $L=20\ m$ z nakładkami sprężającymi
Fig.8. Box girder bridge $Q=7t$, $L=20\ m$ with compressed straps

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki pomiarów linii ugięcia dźwigarów tego mostu przed i po wykonanym procesie sprężania technologicznego.



Rys. 9. Linie ugięć dźwigarów suwnicy pomostowej $Q = 7\ t$, $L=20\ m$ przed i po sprężeniu technologicznym
Fig. 9. Lines of box girder bridge deflections $Q = 7\ t$, $L=20\ m$ before and after technological compression

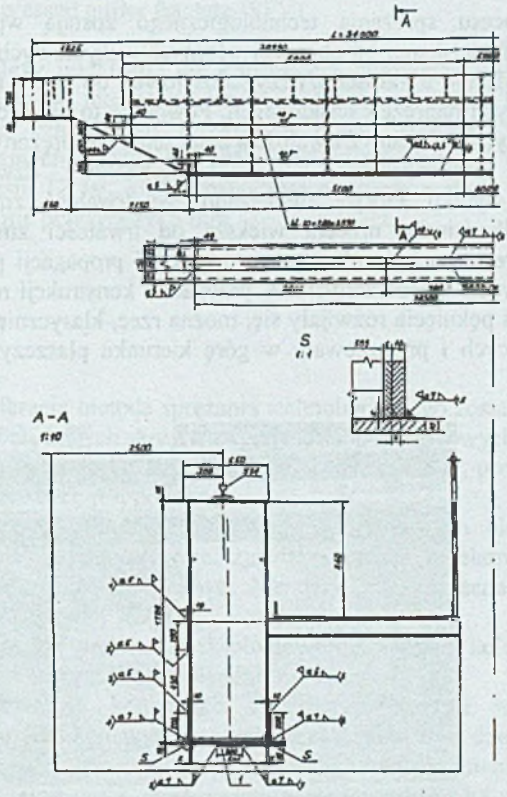
Model matematyczny procesu sprężania został zweryfikowany badaniami eksperymentalnymi, których wyniki porównawcze zestawiono w tabl. 1.

Tabela 1

Porównanie obliczeniowej i pomierzonej wartości wygięcia odwrotnego do istniejącego dźwigarów sprężonych technologicznie

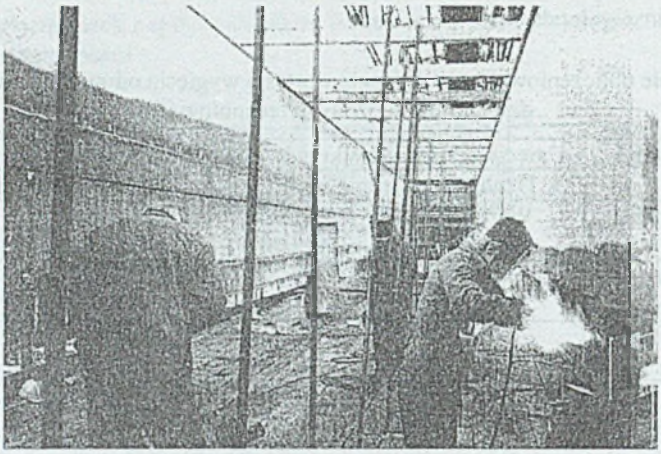
Most suwnicy	Ugięcie wypukłością ku górze w środku rozpiętości dźwigara f[mm]			
	Dźwigar po stronie napędu		Dźwigar po stronie zasilania	
Dane techniczne	Wartość obliczona	Wartość zamierzona	Wartość obliczona	Wartość zamierzona
Q =10,0t *L = 32 m*	42,4	45	37,6	34
Q = 12,5 t *L =31 m*	41	34	41	39
Q = 12,5 t *L = 28 m*	47	47	47	41

Najdłuższy most, który został sprężony, miał długość 34 m. Jego fragment wraz z opisem nakładek sprężających przedstawiono na rys. 10.



Rys.10. Rysunek fragmentu sprężonego dźwigara skrzynkowego suwnicy *Q=16t*

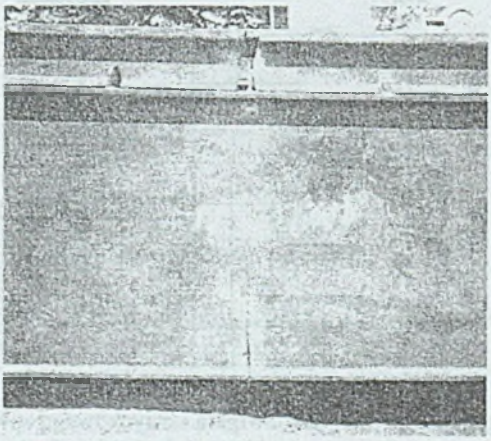
Fig.10. Picture of fragment of compressed box girder bridge *Q=16t*



Rys.11. Fotografia obrazująca spawanie nakładek bocznych dolnych
Fig.11. Picture of side bottom strap welding

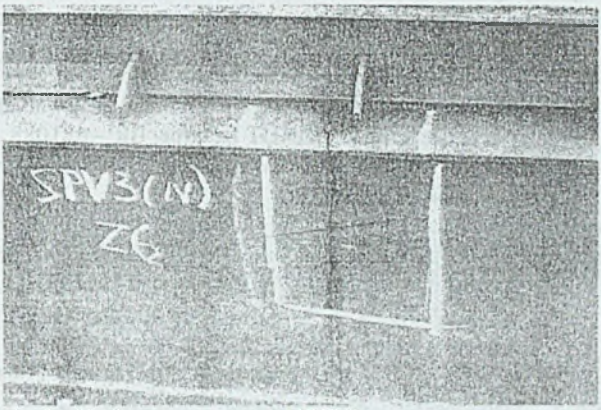
W wyniku procesu sprężania technologicznego zostają wprowadzone naprężenia rozciągające do strefy ściskanej od obciążeń własnych i użytkowych oraz, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia trwałości wytrzymałościowej, do strefy rozciąganej od obciążeń własnych i użytkowych naprężeń ściskających. Powoduje to określony efekt redystrybucji i naprężeń wypadkowych związany z trwałością zmęczeniową sprężonych konstrukcji.

Przeprowadzono stanowiskowe badania zmęczeniowe dźwigarów sprężonych i niesprężonych, w wyniku których wykazano, że trwałość zmęczeniowa konstrukcji sprężonych jest kilkadziesiąt procent większa od trwałości zmęczeniowej konstrukcji niesprężonych. Interesująca była obserwacja inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych konstrukcji sprężonych i niesprężonych. W przypadku konstrukcji niesprężonych inicjacja i następnie propagacja pęknięcia rozwijały się, można rzec, klasycznie w strefie największych naprężeń rozciągających i propagowały w górę kierunku płaszczyzny obojętnej dźwigara (rys.12).



Rys.12. Zdjęcie pęknięcia dźwigara niesprężonego (NS)
Fig.12. Picture of fracture of not compressed girder

Natomiast w przypadku dźwigarów sprężonych inicjacja i propagacja pęknięcia zmęczeniowego rozwijały się w strefie ściskanej pasa górnego i propagowały w dół w kierunku płaszczyzny obojętnej dźwigara, co ilustruje zdjęcie przedstawione na rys. 13.



Rys.13. Zdjęcie pęknięcia dźwigara sprężonego (SPV)
Fig.13. Picture of compressed girder fracture (SPV)

Na zakończenie należy podkreślić, że konstrukcje zregenerowanych metodą sprężania technologicznego dźwigarów mostowych były przedmiotem badań kontrolnych, których celem było określenie czasookresu utrzymania efektu sprężania, mając na uwadze niekorzystny dla sprężonych konstrukcji proces relaksacji naprężeń spawalniczych. Otóż okazało się, że w okresie 12 lat, kiedy rozpoczęto aplikację metody, największy przyrost ujemny strzałki ugięcia nie przekroczył 5 mm.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w referacie metoda sprężania technologicznego została wdrożona na skalę techniczną na wielkogabarytowych skrzynkowych mostach suwnicowych.

Z posiadanych informacji, które cytowano we wstępie referatu, problem trwałych ugięć dźwigarów mostów kolejowych jest podobny.

Konstrukcje mostowe były wykonane również ze stalowych blach grubych gorąco walcowanych, w których występuje również zjawisko pęknięć lamelarnych, co potwierdzają badania prof. dra hab. inż. Zbigniewa Mendery (np. „Ocena węzła spawanego rozwarstwieniem blachy czołowej" (2003)).

Problematyka diagnostyki wieloletnio eksploatowanych mostów kolejowych i drogowych zawarta również w VI Ramowym Programie Unii Europejskiej.

Niezawodność i trwałość konstrukcji mostowych stanowi integralną całość w infrastrukturze kolejowej dlatego wykorzystanie przedstawionego dorobku badawczego w odniesieniu do diagnostyki i regeneracji eksploatowanych mostów suwnicowych pozwoliłoby na ocenę obecnie eksploatowanych mostów kolejowych oraz mogłoby stanowić przedmiot zainteresowania w przypadku podjęcia decyzji dotyczących poprawy stanu technicznego kolejowych konstrukcji mostowych.

Literatura

1. Pilarczyk J.: Mechanizm inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 511. Gliwice 1977.
2. Patent UP RP nr 182671: Sposób naprawy i wzmocnienia odkształconych belek stalowych. WUP 02/02 Warszawa 2002.
3. Myśliwiec M.: Cieplno – mechaniczne podstawy spawalnictwa. WNT, Warszawa 1972.
4. Gallos M.: Opracowanie podstaw teoretycznych wyrównania trwałych ugięć dźwigarów suwnicowych. Prace doświadczalne OBRDiUT Detrans. BR – 481088, Bytom 1987.
5. Blum A.: Diagnostyka i regeneracja wytrzymałościowa skrzynkowych mostów suwnicowych. Wyd. 1, Radom, ITE, 2002.
6. Blum A., Maziarz M.: Method of increasing the welded box girders opeational life time by compesation for fatigue processes. Archives of Civil Engineering, XLVII, 3, 2001 s. 353-367.

Recenzent: Prof. dr hab. Aleksander Sładkowski

Abstract

The phenomenon of welds shrinkage has been utilized in this method where additional cover plates were fillet welded in the tension zone of box girders. As the results of prestressing, the tension stresses were introduced into compressed zone and compression were introduced into tension zone. Such distribution of stresses in this technological process results in the upper contraflexure of the girders what eliminates their permanent vertical deformation being the result of the multiyesr operational use of the crane bridges.