



DARIUSZ SOBALA, *d.sobala@prz.edu.pl*
MACIEJ KULPA, *kulpa@prz.edu.pl*
TOMASZ SIWOWSKI, *siwowski@prz.edu.pl*
Politechnika Rzeszowska

NAPRAWA STALOWYCH DŹWIGARÓW GŁÓWNYCH WIADUKTU METODĄ PROSTOWANIA TERMICZNEGO PO AWARII W TRAKCIE BUDOWY

REPAIR OF VIADUCT'S STEEL GIRDERS BY HEAT STRAIGHTENING AFTER THE FAILURE DURING CONSTRUCTION

Streszczenie W referacie przedstawiono zrealizowaną naprawę plastycznie zdeformowanych stalowych dźwigarów walcowanych metodą prostowania termicznego. Naprawiane dźwigary główne wiaduktu uległy deformacji w wyniku awarii jaka miała miejsce w trakcie budowy. Zastosowana metoda naprawy i zrealizowane procedury kontrolne pozwoliły na przywrócenie pierwotnego stanu uszkodzonym dźwigarom i ponowne ich wbudowanie w przeszło wiaduktu drogowego.

Abstract This paper presents a realized repair of plastic deformed steel rolled beams using heat straightening method. Repaired steel girders were deformed due to accident that occurred during construction. The method used in repair and control procedures carried out made it possible to restore the original characteristics of the damaged beams and re-assembly into a road viaduct span.

1. Wprowadzenie

W trakcie budowy wiaduktu WD-13 w ciągu drogi ekspresowej S-7 na odcinku stanowiącym obwodnicę Kielc doszło w czerwcu 2012 roku do awarii, w wyniku której uszkodzeniu, po upadku ze znacznej wysokości, uległy 4 dźwigary główne stalowe wykonane z kształtowników walcowanych typu HL 1000×748×35220 ze stali S355J2+M.

W tego typu sytuacji typową decyzją jest zastąpienie uszkodzonych dźwigarów nowymi, pozbawionymi uszkodzeń. W omawianym przypadku okazało się to zadaniem trudnym do realizacji w praktyce. Dźwigary były nietypowe i wykonane ze stali o zmodyfikowanych cechach, co oznaczało w praktyce ponowne ich wywalcowanie na zamówienie. Czas oczekiwania na produkcję i dostawę dźwigarów był nie do zaakceptowania na budowie, której harmonogram był bardzo napięty. Poza tym nie bez znaczenia były koszty związane z zakupem i wytworzeniem nowych dźwigarów. W związku z powyższym wykonawca konstrukcji stalowej i montażu podjął próbę naprawy dźwigarów stosunkowo rzadko wykorzystywaną metodą prostowania termicznego. Nadzór budowy zaakceptował propozycję wykonawcy warunkując ewentualne dopuszczenie dźwigarów po naprawie do ponownego wbudowania wykazaniem, że naprawa była skuteczna i nie wpłynęła negatywnie na naprawiane elementy. W związku z brakiem krajowych regulacji normowych dla metody prostowania termicznego elementów stalowych dodatkowym wymogiem nadzoru budowy było sprawowanie nadzoru naukowego nad naprawą przez jedną z instytucji naukowo-badawczych. Sprawowanie nadzoru naukowego nad naprawą

uszkodzonych dźwigarów powierzono ostatecznie Zakładowi Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej.

Nadzór naukowy nad naprawą obejmował w tym przypadku:

- ocenę możliwości i ogólnych zasad naprawy poszczególnych uszkodzeń dźwigarów metodami zaproponowanymi przez wykonawcę;
- ocenę i ewentualną korektę programu naprawy opracowanego przez wykonawcę;
- opracowanie programu niezbędnych pomiarów i badań towarzyszących naprawie umożliwiających jej prawidłowe udokumentowanie oraz ocenę skuteczności;
- sprawowanie bezpośredniego nadzoru nad pracami i ocenę zgodności przebiegu naprawy z zaakceptowanym programem oraz
- końcową analizę wyników pomiarów i badań oraz ocenę skuteczności naprawy, tj. stopnia przywrócenia uszkodzonym dźwigarom charakterystyk umożliwiający ich ponowny montaż i wbudowanie w przeszło obiekcie WD-13.

Referat przedstawia przyjęte zasady, sposób i przebieg naprawy oraz ocenę jej skuteczności, co ostatecznie umożliwiło ponownie zamontowane i wbudowane dźwigarów w przeszło nowego wiaduktu.

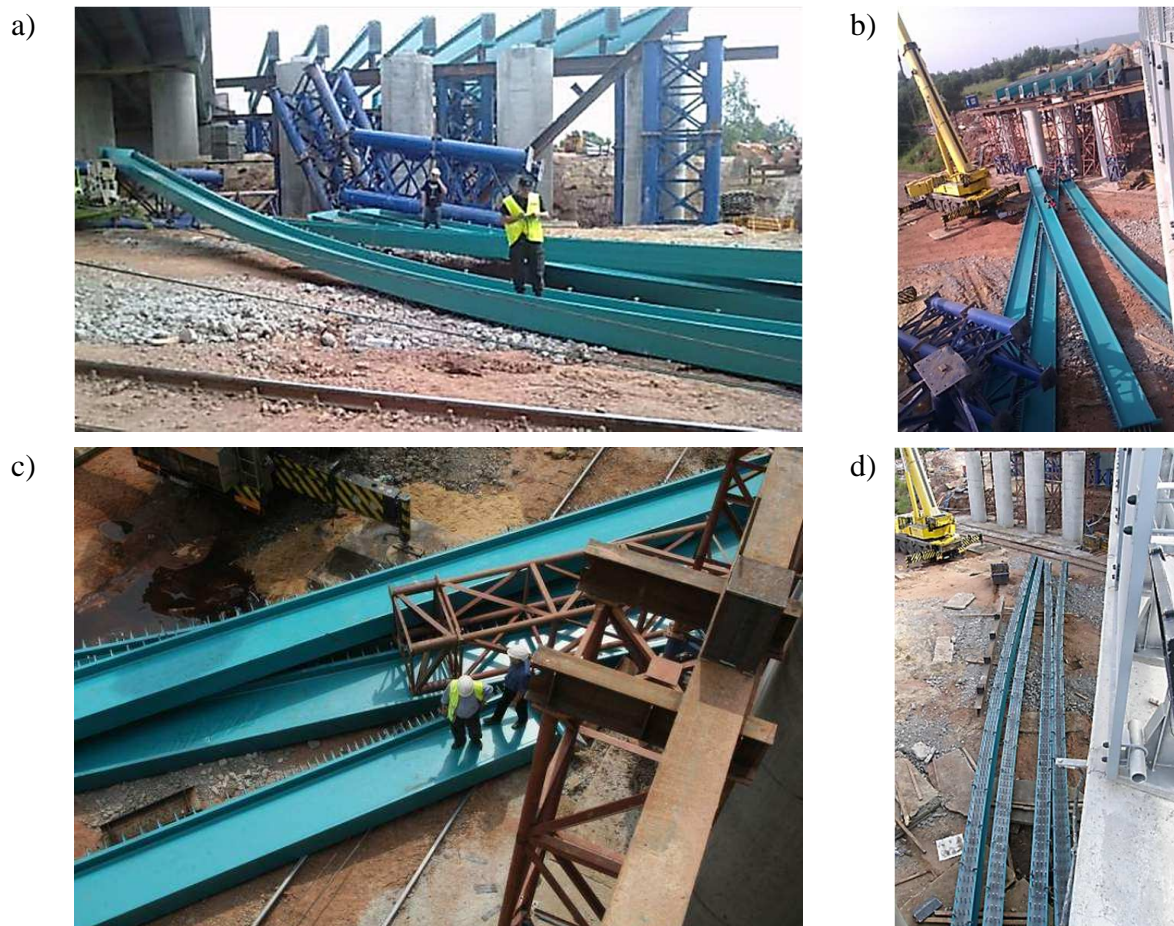
2. Awaria, uszkodzenia dźwigarów i decyzje podjęte bezpośrednio po awarii

Uszkodzone dźwigary to kształtowniki walcowane typu HL 1000×748×35220 ze stali S355J2+M. Stal dźwigarów zgodnie z PN-EN 10025-2 charakteryzuje się następującymi parametrami: skład chemiczny – maks. C = 0,22%, Mn = 1,60%, Si = 0,55%, P = 0,025%, S = 0,025%, równoważnik węgla – 0,45 dla $g < 40$ mm, 0,47 dla $40 < g < 150$ mm, 0,49 dla $g > 150$ mm, gdzie g jest grubością elementu, własności mechaniczne – stal całkowicie uspokojona, jakościowa, o granicy plastyczności od 355÷265 MPa oraz wytrzymałość na rozciąganie od 450÷680 MPa dla grubości blach do 400 mm, charakteryzująca się wysoką ciągliwością (charakterystyki dotyczą stali bez obróbki termomechanicznej).

Do awarii doszło między zmianami roboczymi. Autorzy referatu nie zajmowali się wyjaśnianiem bezpośrednich jej przyczyn. Identyczne dźwigary (scalone przed montażem w wytwórni z trzech docinków dwuteowników o długościach ok. 10 m + 15,2 m + 10 m) zostały wcześniej wielokrotnie zmontowane w ten sam sposób w oddanym do użytku równoległym obiekcie w ciągu sąsiedniej jezdni drogi ekspresowej S-7. Do montażu dźwigarów, które uległy awarii, wykorzystano dźwig i prefabrykowane podpory montażowe zwieńczone oczepami z dwuteowników. Dźwigary, ze względu na kształt poprzecznic podporowej uciągającej, opierały się na oczepach stalowych za pośrednictwem stosunkowo wysokich stołków montażowych (fot. 1a).

Po upadku z rusztowań dźwigary znajdowały się w pozycji bocznej na terenie, częściowo na poprzednio upadających dźwigarach oraz elementach podpór montażowych (fot. 1a-c). W czasie upadku dźwigary uderzały wzajemnie o siebie oraz o liczne elementy wyposażenia placu budowy (uszkodziły m.in. dźwig używany do ich montażu). Na dźwigary upadły również elementy podpór montażowych. Długie elementy dźwigarów pod wpływem upadku ze znacznej wysokości, zginania w trakcie i po awarii (głównie w kierunku słabszej osi równoległej do osi środkowej), pracy pod obciążeniem ciężarem własnym i innymi elementami w warunkach przypadkowego i relatywnie dużego rozstawu punktów podparcia zlokalizowanych na różnych poziomach oraz uderzeń kolejnych dźwigarów i elementów podpór montażowych doznały deformacji plastycznych oraz uszkodzeń lokalnych (deformacji, wgnieceń, ubytków materiału oraz wyłamania drobnych elementów). Uszkodzenia obejmowały dźwigary główne, sworznie i uchwyty montażowe pod deskowanie płyty.

Dźwigary, które uległy awarii w całości zostały podniesione, ustawione w pozycji pionowej na placu budowy (fot. 1d), rozcięte w miejscu spawanych styków warsztatowych i przewiezione do wytwórni w celu oceny ich stanu oraz przeprowadzenia naprawy. Niektóre elementy transportowe zostały poddane oczyszczeniu z powłok malarskich. Na tym etapie do nadzoru naukowego nad procesem naprawy dźwigarów włączony został zespół Politechniki Rzeszowskiej.



Fot. 1. Dźwigary bezpośrednio po awarii (a, b i c) oraz przygotowane do rozcięcia i transportu (d)

3. Metody i procedura naprawy

Metody naprawy zaproponowane przez wykonawcę musiały umożliwiać naprawę deformacji dźwigarów walcowanych i uszkodzeń lokalnych powstałych w trakcie awarii, pozostawać w zasięgu technologicznym i ekonomicznym wykonawcy przy ewentualnych nieznacznych zakupach inwestycyjnych oraz być stosunkowo proste i szybkie w realizacji. Dla nadzoru naukowego również istotne była możliwość pełnej kontroli zaproponowanych metod w zakresie efektów naprawy oraz ewentualnych skutków ubocznych.

Wykonawca przedstawił program naprawy, który podlegał opiniowaniu nadzoru naukowego. Program proponował wykonanie naprawy zasadniczych uszkodzeń (deformacji) dźwigarów metodą prostowania termicznego. Drobne uszkodzenia (wgniecenia) zaproponowano naprawić przez napawanie, a uszkodzone drobne elementy, takie jak sworznie i uchwyty montażowe, planowano wymienić. Nadzór naukowy wprowadził do programu naprawy liczne zmiany i uzupełnienia, m.in.:

- uaktualnił spis dokumentów odniesienia (norm), a tym samym stosowanych procedur i metod kontroli,
- wprowadził program pomiarów i badań obejmujący inwentaryzacje geodezyjne, badania stref uszkodzeń (deformacji) i stref naprawy oraz stref sąsiadujących metodą wizualną, ultradźwiękową i magnetyczno-proszkową w celu wykrycia wszystkich uszkodzeń przed, w trakcie i po naprawie, a także kontrolę procesu prostowania w zakresie temperatury, czasu, miejsc i wielokrotności nagrzewania.

Ustalono, że pozostałe czynności technologiczne po naprawie, takie jak powtórne scalanie dźwigarów, zabezpieczenie antykorozyjne, transport i montaż, będą odbywać się zgodnie z wymaganiami kontraktu (poza zakresem nadzoru naukowego).

Największy wkład merytoryczny nadzoru naukowego do procesu naprawy dotyczył doboru parametrów technologicznych dla metody prostowania termicznego. W Polsce brak jest przepisów i standardowych procedur pozwalających na ich wdrożenie w przypadku omawianej naprawy. Stąd powstała potrzeba opracowania i wdrożenia procedur indywidualnych oraz oceny ich skuteczności dla potrzeb tej konkretnej naprawy nietypowych dźwigarów walcowanych.

Prostowanie termiczne to proces likwidowania deformacji elementu metalowego za pomocą nagrzewania źródłem ciepła (np. płomieniem) [2]. Nagrzewanie to proces dostarczania energii cieplnej do prostowanego elementu, np. przy użyciu palnika. Nagrzewanie wywołuje zwykle gradient temperatury, czyli różnicę temperatury na grubości, szerokości lub wysokości elementu. W wyniku lokalnego nagrzewania powierzchni prostowanego elementu jego części nienagrzane otaczające obszar nagrzany nie pozwalają materiałowi swobodnie się rozszerzać. W dostatecznie wysokiej temperaturze powstają odkształcenia plastyczne takie jak w przypadku rozszerzania swobodnego, zmniejszone o odkształcenia sprężyste. Po usunięciu źródła ciepła odkształcenia plastyczne pozostają. Skuteczność prostowania termicznego zależy od wielu czynników, takich jak: parametry technologiczne (m.in. temperatura nagrzewania i stygnięcia, moc cieplna palników, pochylenie i odległość dyszy palnika, prędkość przesuwania palnika), własności mechaniczne i cieplno-fizyczne materiału prostowanego elementu (m.in. granica plastyczności, współczynnik przewodnictwa cieplnego, ciągliwość, twardość), charakterystyka geometryczna prostowanego elementu, sposób nagrzewania (klinowe, pasmowe/liniowe, punktowe oraz ich kolejność) oraz reakcja elementu na przyłożone ciepło (m.in. naprężenia początkowe, wspomaganie nagrzewania oddziaływaniem mechanicznym, więzy wewnętrzne prostowanego elementu/przekroju, wielokrotność nagrzewania, wpływ hartowania).

Podczas procesu prostowania termicznego (nagrzewania) zmieniają się właściwości mechaniczne i cieplno-fizyczne materiału, ale w procesie stygnięcia wracają one z reguły do stanu pierwotnego. W miarę przyrostu temperatury elementu maleją współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik sprężystości podłużnej i granica plastyczności, a rosną współczynnik konwekcji, współczynnik emisji, współczynnik rozszerzalności termicznej oraz ciepło właściwe.

Prostowanie dźwigarów jest, tak jak w omawianym przypadku, realizowane przy użyciu palników z mieszkanką acetylenowo-tlenową, która spala się w temperaturze 2750÷3300°C. Wysoka temperatura spalania pozwala łatwiej kontrolować proces prostowania. Wykorzystywane palniki powinny mieć odpowiednią moc cieplną. W omawianej naprawie wykorzystano palniki o mocy 45 kW. W przypadku niewielkich deformacji, z jakimi mieliśmy do czynienia w tym przypadku, do prostowania termicznego wykorzystuje się technikę nagrzewania liniowego. Nagrzewanie odbywa się po wypukłej stronie dźwigara, która docelowo ma ulec skróceniu. Technika ta jest często wykorzystywana do nadawania dźwigarom stalowym podniesienia wykonawczego.

Dopuszczalna maksymalna temperatura nagrzania jaką przyjęto ostatecznie dla stali S355J2+M to 650°C. W praktyce widoczne odkształcenia termiczne występują dopiero przy

temperaturze 370°C, a po przekroczeniu temperatury 768°C zniszczeniu ulega powierzchnia elementu. Zatem przyjęty zakres temperatury roboczej w przedziale 370÷650°C należy uznać za prawidłowy, umożliwiający skuteczną naprawę deformacji dźwigara bez istotnego wpływu na właściwości materiału dźwigarów po naprawie.

Po nagrzeniu stosuje się zwykle samoistne stygnięcie stali. Przyspieszanie procesu stygnięcia może prowadzić do negatywnych zjawisk w materiale, polegających na zahartowaniu stali, chociaż zwiększa to zwykle skuteczność procesu prostowania. W omawianej naprawie stosowano stygnięcie samoistne.

Czas nagrzewania jest jednym z najważniejszych parametrów procesu prostowania termicznego. Nie ma jednak wyraźnego związku między czasem nagrzewania a uzyskiwanym odkształceniem elementu [1]. Czas powinien być na tyle długi, aby powstał odpowiedni gradient temperatury na grubości blachy oraz wystarczająco krótki, aby uzyskać odpowiedni rozkład temperatury na powierzchni.

Przy tego typu naprawach zwykle stosuje się wspomaganie mechaniczne procesu prostowania termicznego. W przypadku omawianej naprawy, ze względu na znaczne gabaryty prostowanych elementów, nie stosowano wspomaganie mechanicznego prostowania poza wykorzystaniem ciężaru własnego dźwigarów.

Dla stali S355J2+M wartość maksymalnych nadających się do prostowania deformacji wyznacza się ograniczając od dołu promień krzywizny prostowanych elementów $R_{min} = b/0,0517242$ [1], gdzie b jest szerokością w płaszczyźnie wygięcia. W przypadku naprawianych dźwigarów przy odkształceniach z płaszczyzny pionowej $R_{min} = 8059$ mm, a pomierzone promienie deformacji były znacznie większe, co jednoznacznie kwalifikowało dźwigary do naprawy przez prostowanie termiczne.

Jak wynikało z analizy dostępnego piśmiennictwa wpływ prostowania termicznego na właściwości dźwigarów mostowych jest następujący [2, 3, 4]:

- jeden cykl prostowania termicznego prowadzi do niewielkiego spadku modułu sprężystości i ciągliwość, ale równocześnie następuje podwyższenie granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. Wartość stosunku R_e/R_m wzrasta z ok. 68% przed prostowaniem termicznym do 78% po jednym cyklu prostowania termicznego;
- pierwsze dwa cykle prostowania nie mają wpływu na wytrzymałość zmęczeniową, trzeci i kolejne cykle prostowania termicznego (wielokrotna naprawa uszkodzonego elementu) znacznie zmniejszają wytrzymałość zmęczeniową stali prostowanej termicznie;
- zgodnie z zalecaniami przepisów amerykańskich [3, 4] naprawa wielokrotnie zdeformowanych elementów metodą prostowania termiczne powinna być ograniczona do maksymalnie dwóch cykli – po kolejnym uszkodzeniu zdeformowany element należy wymienić;
- prostowanie termiczne nie wpływa na nośność dźwigarów, które zdolne są do przeniesienia analogicznych obciążeń jak te, które nie zostały poddane prostowaniu.

Warto podkreślić, że cytowane wyżej publikacje odnoszą się do elementów, które poddawane są wielokrotnym uszkodzeniom i kolejnym cyklom prostowania termicznego, a ich uszkodzenia mają zdecydowanie większy zakres niż w przypadku omawianych dźwigarów.

W oparciu o dostępne informacje prawidłowo zastosowana metoda prostowania termicznego wraz z innymi metodami napraw lokalnych (tj. spawaniem, napawaniem, wymianą drobnych elementów) mogła zostać wykorzystana do skutecznej naprawy zdeformowanych w wyniku awarii dźwigarów bez istotnego wpływu na ich cechy materiałowe.

4. Naprawa dźwigarów

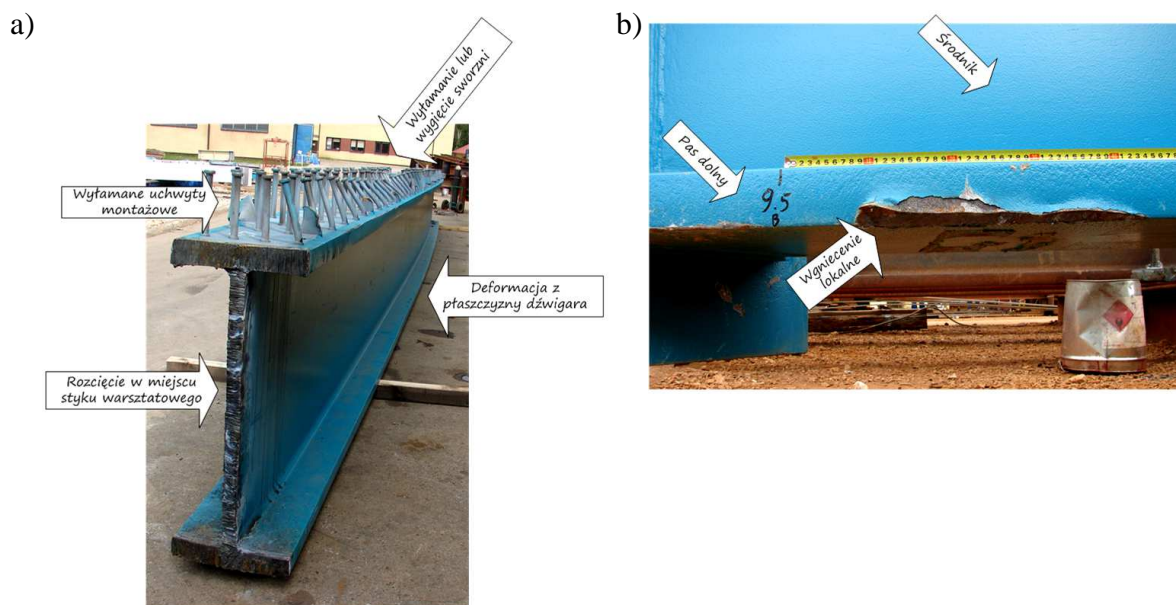
Naprawę we własnym zakresie przeprowadził wykonawca. Swoją bazę sprzętową musiał jedynie uzupełnić o planiki większej mocy. Przed przystąpieniem do naprawy oczyszczono

dźwigary z powłok antykorozyjnych w stopniu umożliwiającym jej realizację. Wstępna inwentaryzacja uszkodzeń w podobnych przypadkach powinna odbywać się przed oczyszczeniem dźwigarów z powłok malarskich (zdecydowanie łatwiej jest wówczas zlokalizować miejsca ewentualnych uszkodzeń materiałowych, które – jeśli występują – pokrywają się najczęściej z uszkodzeniami powłok), jednak ze względu na zbyt późne włączenie nadzoru naukowego w proces naprawy tego etapu inwentaryzacji nie zrealizowano. Efektem tego było dokonanie większej liczby napraw niż wynikało to bezpośrednio z inwentaryzacji uszkodzeń przeprowadzonej przed naprawą (w jej trakcie odnajdowano kolejne uszkodzenia).

Naprawę deformacji dźwigarów podzielono i zrealizowano w trzech głównych, następujących po sobie etapach oddzielnie dla każdego z naprawianych odcinków dźwigarów.

Etap 1 obejmował pomiary i badania mające na celu ocenę stanu technicznego odcinków dźwigarów po awarii oraz określenie niezbędnego zakresu naprawy. Były to:

- inwentaryzacja geometryczna, która w odniesieniu do dźwigarów walcowanych obejmowała pomiar geodezyjny wygięcia w poziomie pasów górnych i dolnych od płaszczyzny pionowej, wygięcia dźwigara w płaszczyźnie pionowej oraz wygięcia półek w przekroju poprzecznym dźwigara w stosunku do płaszczyzny poziomej (prostopadłej do płaszczyzny średnika), a w odniesieniu do sworzni – pochylenie przekraczające 30° , czyli odpowiadające maksymalnemu pochyleniu dopuszczalnemu przy badaniach mocowania sworzni;
- badania wizualne stanu połączeń sworzni i uchwytów montażowych – uszkodzenia połączenia kwalifikowały elementy do wymiany – oraz stanu materiału dźwigarów wraz z inwentaryzacją uszkodzeń – 100% powierzchni – wg PN-EN 13018, PN-EN 13927 i PN-ISO 3058.
- badania stanu materiału dźwigarów metodą magnetyczno-proszkową wg PN-EN ISO 9934-1, PN-EN ISO 9934-2, PN-EN ISO 9934-3, PN-EN ISO 3059 oraz ultradźwiękową wg PN-EN 583-1, PN-EN 583-2, PN-EN 583-5, PN-EN 10160 na:
 - ok. 40% losowo wybranej powierzchni dźwigarów (fot. 3);
 - 100% powierzchni dźwigarów zlokalizowanej w odległości $\pm 0,5$ m od zinwentaryzowanych uszkodzeń.

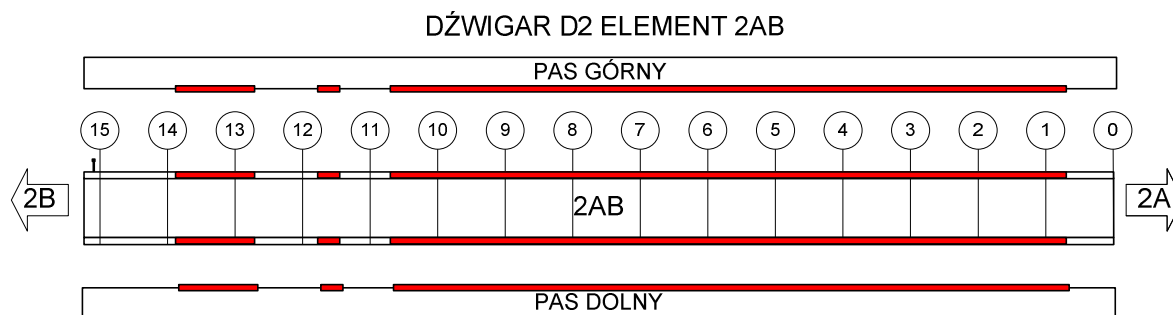


Fot. 2. Przykładowe uszkodzenia dźwigarów: a) deformacja dźwigara, wylamane lub pocięte uchwyty montażowe oraz sworznie, b) lokalne wgniecenie krawędzi pasa dolnego

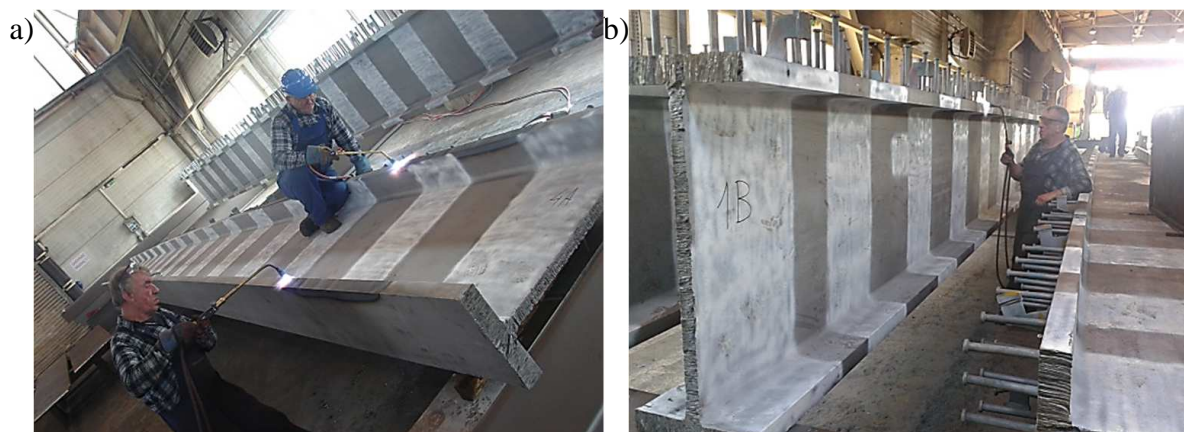
Zrealizowane pomiary i badania należy uznać za standardowe i znormalizowane. Wyniki przeprowadzonych pomiarów i badań stanowiły podstawę do porównania z wymaganiami odpowiednich norm oraz zakwalifikowania poszczególnych odcinków dźwigarów do naprawy uszkodzeń lokalnych lub/i prostowania metodą termiczną, a elementów sworzni i uchwytych montażowych do wymiany zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 10163-3 (tab. 1).

Etap 2 obejmował przeprowadzenie napraw w zakresie adekwatnym do zinwentaryzowanych uszkodzeń i przeprowadzonej kwalifikacji (tab. 1). Naprawy polegały na:

- wymianie uszkodzonych sworzni i uchwytych montażowych (fot. 2a) na nowe;
- naprawie uszkodzeń lokalnych (niewielkich wgniecień lub nieciągłości – np. fot. 2b) przez wyszlifowanie, nacięcie, napawanie materiału oraz ponowne wyszlifowanie;
- prostowaniu termicznym dźwigarów wraz ze sporządzeniem karty naprawy dokumentującej miejsca, czas i temperaturę grzania naprawianego elementu (rys. 1 i fot. 3).



Rys. 1. Przykładowy schemat nagrzewania w trakcie prostowania termicznego dla pojedynczego elementu



Fot. 3. Prostowanie termiczne: a) wspomagane ciężarem własnym dźwigara, b) bez wspomagania – dźwigar w pozycji pionowej

Na podstawie przeprowadzonych w toku całej naprawy pomiarów i badań stwierdzono istnienie i naprawiono 87 uszkodzeń miejscowych, 30 lokalnych ubytków materiału oraz wymieniono 509 uszkodzonych sworzni i 105 uszkodzonych uchwytych montażowych oraz wyprostowano termicznie cztery (na dwanaście) środkowe odcinki dźwigarów walcowanych.

Zrealizowane naprawy można uznać za standardowe (napawanie, wymiana elementów) za wyjątkiem prostowania termicznego, którego przydatność, procedury przeprowadzenia oraz ocena skuteczności i wpływu na stan techniczny naprawianych elementów wymaga praktycznie każdorazowo indywidualnego podejścia. W programie naprawy wykonawcy proces prostowania termicznego został opisany ogólnie ze względu na brak niezbędnych danych

na temat koniecznego zakresu naprawy. Dane te zostały zgromadzone w etapie 1 naprawy (po przeprowadzeniu pomiarów i badań), a sam parametry procesu były ustalane indywidualnie (rys. 1 i tab. 2) dla każdego uszkodzenia wg określonych przez nadzór naukowy zasad ramowych podanych w programie wykonawcy.

Etap 3 obejmował pomiary i badania mające na celu ocenę skuteczności naprawy i stanu technicznego odcinków dźwigarów po naprawie, tj. inwentaryzację geometryczną elementów poddanych naprawie metodą prostowania termicznego, badania stanu materiału dźwigarów metodą wizualną wg ww. norm – 100% powierzchni poddanej naprawie – oraz metodą magnetyczno-proszkową (np. rys. 2) oraz ultradźwiękową wg ww. norm na 100% powierzchni dźwigarów zlokalizowanej w odległości do $\pm 0,5$ m od miejsca naprawy.

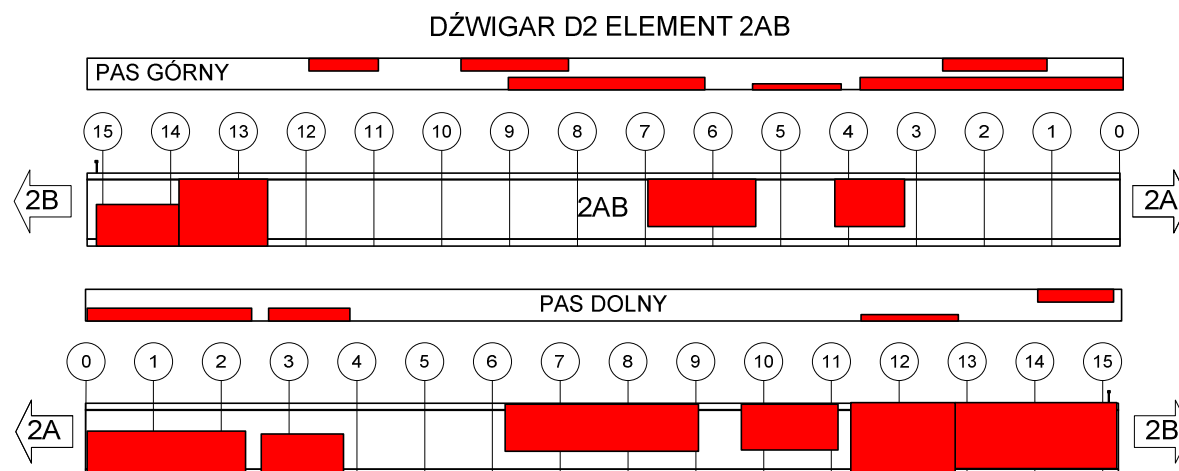
Tabela 1. Zestawienie wyników badań (liczba wykrytych uszkodzeń) i pomiarów geodezyjnych wykonanych przed naprawą (jasne pola) i po naprawie (ciemne pola) wraz z zaleconym zakresem naprawy

Element	Badania						Pomiary geodezyjne				Zalecenia											
	VT				MT	UT	PG	PD	SG	WP	NL	PT										
D2	MU	UL	US	UM									[szt.]	[mm]								
1A	3	0	2	0	39	0	4	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	1	4	4		-
1AB	0	0	3	0	1	0	6	0	21	0	0	0	36	12	38	12	11	11	6	6		+
1B	1	0	2	0	39	0	4	0	0	0	0	0	3	3	7	7	3	3	3	3		-
2A	2	0	1	0	51	0	2	0	0	0	0	0	8	8	8	8	1	1	5	5		-
2AB	0	0	8	0	4	0	9	0	15	0	0	0	56	9	60	9	3	9	6	6		+
2B	2	0	4	0	72	0	9	0	0	0	0	0	5	5	8	8	1	1	6	6		-
3A	4	0	0	0	64	0	4	0	0	0	0	0	5	5	3	3	4	4	5	5		-
3AB	4	0	1	0	16	0	14	0	4	0	0	0	39	8	37	9	2	3	6	6		+
3B	4	0	4	0	48	0	13	0	0	0	0	0	5	5	7	7	1	1	5	5		-
4A	2	0	2	0	70	0	10	0	0	0	0	0	8	8	8	8	1	1	5	5		-
4AB	2	0	1	0	57	0	17	0	22	0	0	0	113	10	114	8	2	0	4	6		+
4B	1	0	2	0	48	0	13	0	0	0	0	0	4	4	7	7	2	2	3	3		-
Maks.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10/15	10/15	-	-	-	6.5				

Element: np. 1A i 1B oznaczają skrajne elementy dźwigara nr 1, a 1AB oznacza element środkowy tego dźwigara.
 Badania: VT – wizualne, MT – magnetyczno-proszkowe, UT – ultradźwiękowe.
 Opis uszkodzeń: MU – miejscowe uszkodzenia; UL – ubytki lokalne materiału; US – uszkodzenia sworzni; UM – uszkodzenia uchwytów montażowych.
 Pomiary geodezyjne:
 PG – maksymalna deformacja dźwigara w płaszczyźnie poziomej na poziomie pasa górnego,
 PD – maksymalna deformacja dźwigara w płaszczyźnie poziomej na poziomie pasa dolnego,
 SG – maksymalna deformacja dźwigara w płaszczyźnie pionowej w odniesieniu do projektowanej,
 WP – maksymalna skośność pólki dźwigara.
 Zalecenia: NL – naprawy lokalne; PT – prostowanie termiczne.
 10/15* – oznacza 10 mm dla elementów skrajnych i 15 mm dla elementów środkowych lecz nie więcej niż 35 mm dla całego dźwigara po ponownym zespawaniu.

Wyniki pomiarów i badań przeprowadzonych po naprawie stanowiły podstawę do ponownego porównania z wymaganiami odpowiednich norm (m.in. PN-EN 10163-3) (tab. 1). Naprawę uznano za skuteczną, jeżeli wszystkie parametry geometryczne mieściły się w tolerancjach produkcyjnych dla nowych dźwigarów, a wszystkie wyniki badań materiałowych wykazywały brak uszkodzeń. Pozytywne wyniki porównania świadczące o skuteczności przeprowadzonej

naprawy wraz z wynikami analizy procesu ewentualnego prostowania termicznego stanowiły podstawę do zakwalifikowania poszczególnych odcinków do ponownego scalenia i zabezpieczenia antykorozyjnego w oparciu o procedury obowiązujące na kontrakcie.



Rys. 2. Przykładowy schemat rozmieszczenia obszarów poddanych badaniom metodą magnetyczno-proszkową dla pojedynczego elementu

Tabela 2. Parametry zrealizowanego procesu prostowania termicznego

Element D2	Czasy grzania [min]			Temperatury grzania [°C]	
	Min.	Maks.	Całkowity	Min.	Maks.
1AB	5	18	116	400	463
2AB	5	14	238	400	468
3AB	6	20	295	400	515
4AB	735	1202	312	400	493
Dopuszczalne	—	—	—	350	650

5. Podsumowanie i wnioski

Pomiarom, badaniom i naprawie zgodnie z programem wykonawcy uzupełnionym przez nadzór naukowy poddano elementy powstałe w wyniku przecięcia dźwigarów w miejscu wcześniej wykonanych styków warsztatowych.

W trakcie awarii w dźwigarach wystąpiły uszkodzenia o charakterze mechanicznym: deformacje (głównie boczne z płaszczyzny pionowej) o charakterze plastycznym oraz uszkodzenia lokalne powstałe w wyniku uderzeń bezpośrednich, które zostały zidentyfikowane i zinwentaryzowane w trakcie pomiarów geometrii dźwigarów, badań wizualnych, magnetyczno-proszkowych i ultradźwiękowych. Zakres i wielkość uszkodzeń sklasyfikowano jako stosunkowo niewielki i pozwalający na skuteczne przeprowadzenie naprawy dźwigarów. Istotne deformacje, przekraczające tolerancje produkcyjne, wystąpiły wyłącznie w odcinkach środkowych dźwigarów i wymagały naprawy metodą prostowania termicznego. Na pozostałych odcinkach deformacje, jeśli wystąpiły, mieściły się w tolerancjach produkcyjnych. Typowym naprawom lokalnym polegającym na uzupełnianiu ubytków i uszkodzeń przez napawanie poddano wszystkie elementy. Nadmiernie zdeformowane lub/i uszkodzone sworznie i uchwyty montażowe wymieniono na nowe.

Naprawa metodą prostowania termicznego i naprawy lokalne okazały się tanie, skuteczne i szybkie, a ich przeprowadzenie nie spowodowało powstania nowych uszkodzeń. Naprawione dźwigary spełniają wymagania właściwych norm pod względem geometrycznym

i materiałowym i mogły zostać ponownie scalone, zabezpieczone antykorozyjnie oraz wbudowane. W celu ochrony przed ewentualnym zagrożeniem uderzeniem w trakcie użytkowania (dopiero kilkukrotna naprawa przez prostowanie termiczne wpływa negatywnie na właściwości naprawianych elementów) dźwigary po naprawie zalecono zamontować w przekroju poprzecznym od strony osi drogi.

Istotna w całym procesie naprawy była rola nadzoru naukowego, który sprawdzał i opiniował przedkładane przez Wykonawcę dokumentacje projektowe (program naprawy), nadzorował bezpośrednio prowadzenie nietypowych robót naprawczych oraz wykonał analizę wyników pomiarów i badań oraz ocenił skutki naprawy przeprowadzonej nieznormalizowaną metodą prostowania termicznego.

Metodę prostowania termicznego wykorzystano w nietypowym zakresie do skutecznej, stosunkowo taniej i szybkiej naprawy masywnych dźwigarów walcowanych o znacznych gabarytach i stosunkowo niewielkich deformacji.

Literatura

1. Zobel H.: Vademecum bieżącego utrzymania i odnowy drogowych obiektów mostowych. Tom 6. Mosty stalowe. Rozdział 6.11. Prostowanie termiczne elementów. GDDP. Warszawa 1994.
2. CTC & Associates LLC, WisDOT Research & Library Unit: Effect of Heat Straightening on Girders Subjected to Multiple Repairs. WHRP Structures TOC. December 22, 2009
3. US Department of Transportation: Guide for Heat-Straightening of Damaged Steel Bridge Members. FHWA 2011
4. Connor R.J., Urban M.J., Kaufmann E.J.: Heat-Straightening Repair of Damaged Steel Bridge Girders: Fatigue and Fracture Performance. NCHRP. Report 604
5. PN-EN 10034. Dwuścowniki I i H ze stali konstrukcyjnej. Dopuszczalne odchyłki wymiarowe i odchyłki kształtu
6. PN-EN 10160. Badanie ultradźwiękowe wyrobów stalowych płaskich grubości równej lub większej niż 6 mm (metoda echa)
7. PN-EN 10163-3. Wymagania dotyczące stanu powierzchni przy dostawie stalowych blach grubych, blach uniwersalnych i kształtowników walcowanych na gorąco. Część 3: Kształtowniki
8. PN-EN 13018. Badania nieniszczące. Badania wizualne. Zasady ogólne.
9. PN-EN 13927 Badania nieniszczące. Badania wizualne. Wyposażenie
10. PN-EN 583-1. Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Część 1: Zasady ogólne
11. PN-EN ISO 3059. Badania nieniszczące. Badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe. Warunki obserwacji.
12. PN-EN ISO 9934-1, Badania nieniszczące. Badanie magnetyczno-proszkowe. Część 1: Zasady ogólne
13. PN-EN ISO 9934-2. Badania nieniszczące. Badanie magnetyczno-proszkowe. Część 2: Środki wykrywające
14. PN-EN ISO 9934-3. Badania nieniszczące. Badanie magnetyczno-proszkowe. Część 3: Aparatura
15. PN-EN 583-2. Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Część 2: Nastawianie czułości i zakresu obserwacji
16. PN-EN 583-5. Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe. Część 5: Charakteryzowanie i wymiarowanie nieciągłości.
17. PN-ISO 3058. Badania nieniszczące. Przyrządy pomocnicze do badań wizualnych. Dobór lup o małych powiększeniach.