

Sławomir Rowiński

Opis rozprawy doktorskiej pt.: „*Wytrzymałość zmęczeniowa łącznika stalowego w innowacyjnym zespoleniu belki stalowo-betonowej*”

Konstrukcje zespolone stalowo–betonowe powstają w wyniku odpowiedniego połączenia stalowych elementów konstrukcyjnych z betonem. Połączenie to umożliwia współpracę dwóch części składowych konstrukcji, dzięki czemu możliwe jest efektywniejsze wykorzystanie parametrów wytrzymałościowych materiałów. Najczęściej zespolenie oznacza połączenie mechaniczne przy użyciu różnego rodzaju łączników obcych. Podstawowym problemem tych rozwiązań był etap prefabrykacji stalowych belek zespolonych, czyli montaż łączników, który wymagał dużej czasochłonności i pracochłonności. Ponadto belki stalowe musiały mieć kształt dwuteowy, co zwiększało zużycie części stalowej belki.

Innowacyjny typ zespolenia w belce stalowo-betonowej umożliwił skrócić czas wykonywania belek stalowych, tym samym zredukować koszty ich prefabrykacji. Istotą innowacyjnego zespolenia jest rozcięcie stalowego środka belki walcowanej linią w taki sposób, aby uzyskane zęby w każdej z części, po ich zabetonowaniu w płycie, stanowiły typ łącznika mechanicznego, przenoszącego siły rozwarstwiające między stalą a betonem. Siły rozwarstwiające ulegają zmianie w każdym zębie i są przenoszone przez bezpośredni docisk betonu do powierzchni czołowej zęba oraz przez siły przyczepności między płaskimi powierzchniami belki stalowej a betonem. Kształt linii wycięcia zębów był wielokrotnie modyfikowany i optymalizowany. Najnowszym, łączącym wiele zalet poprzednich jest kształt oznaczany w Europie jako MLC.

Krzywoliniowy brzeg zęba typu MCL jest karbem geometrycznym, który zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową belki stalowej. W zależności od grubości części betonowej, zęby stalowe mogą pracować w przekroju naprężeń rozciągających. W przypadku obciążeń cyklicznych jest to niebezpieczne, gdyż w sytuacji inicjacji rysy zmęczeniowej, może ona propagować aż do utraty nośności całego przekroju belki stalowej. Takiego problemu nie było w rozwiązaniach z łącznikami obcymi, np. sworzniami, w których propagujące pęknięcie mogło się zatrzymać, gdy doszło do poziomu strefy ściskanej w środku.

Analizy zmęczeniowe konstrukcji z wykorzystaniem innowacyjnego zespolenia są utrudnione ze względu na nietypowy układ stanu wyężenia zębów stalowych, który może ulec zmianie w raz z liczbą cykli albo pojawieniem się w zębie pęknięcia. Ponadto na wytrzymałość zmęczeniową może mieć wpływ jakość powierzchni czołowych łączników, która zależy głównie od technologii wycinania zębów. Zagadnienia te komplikują badania wytrzymałości zmęczeniowej łączników typu MCL, które do tej pory nie zostały przeprowadzone.

W rozprawie postawiono tezy, które udowodniono na drodze doświadczalnej, numerycznej i analitycznej:

1. Technologia wycinania kształtu łącznika stalowego w innowacyjnym zespoleniu może mieć wpływ na wytrzymałość zmęczeniową łącznika.
2. Możliwe są dwa mechanizmy zniszczenia zmęczeniowego łącznika stalowego typu MCL w innowacyjnym zespoleniu belki stalowo – betonowej: rozerwanie stalowej stopki oraz wyrwanie zęba stalowego.
3. Wyrwanie zęba stalowego typu MCL jest powodowane utworzeniem się i propagacją drugiej rysy w jego górnej części, po przeciwnej stronie co rysa pierwsza.

Do realizacji zamierzeń przeprowadzono dwa niezależne badania doświadczalne. Pierwsze to badania cykliczne na próbkach wioselkowych wycinanych przy wykorzystaniu trzech technologii cięcia: gazowego tlenowo – acetylenowego, plazmą oraz wodą. Uzyskane wyniki wskazały na możliwość wpływu technologii wycinania kształtu innowacyjnych łączników na ich wytrzymałość zmęczeniową. Łączniki wycinane przy wykorzystaniu technologii cięcia gazowego tlenowo – acetylenowego mogą mieć większą wytrzymałość zmęczeniową w porównaniu do pozostałych dwóch technologii cięcia plazmą albo wodą. Wniosek ten dowiódł prawdziwości pierwszej tezy postawionej w pracy. W badaniach zwrócono uwagę na jakość powierzchni wycinania próbek. Dla wybranych próbek przeprowadzono pomiary chropowatości tych powierzchni oraz wykonano badania makroskopowe i mikroskopowe materiału w miejscach pęknięć zmęczeniowych. Uzyskane rezultaty w porównaniu z wynikami z innych badań oddziaływania chropowatości powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową próbek wskazały, że wpływ technologii wycinania kształtu łącznika w stalowej listwie zespalażącej może być większy aniżeli wpływ stanu powierzchni ich cięcia. Wyniki z badań sugerują, że należy uzupełnić dane literaturowe o kolejny czynnik wpływający na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji, tj. wpływ technologii cięcia, który do tej pory nie był opisywany. Określenie wartości wpływu technologii cięcia wymaga przeprowadzenia kolejnych badań doświadczalnych na większej liczbie prób. Wyniki z przeprowadzonych badań należy traktować jako wstępne. Niemniej jednak były one istotne z punktu widzenia wyboru technologii wycinania innowacyjnych łączników typu MCL do kolejnych, zasadniczych badań belek zespolonych.

Drugie badania cykliczne przeprowadzono dla belek zespolonych z innowacyjnym zespoleniem listwowym typu MCL. Ze względu na złożoną geometrię przekroju belki oraz różne wytrzymałości i moduły sprężystości wykorzystanych materiałów, wykonano belki w skali zbliżonej do naturalnej. Z jednej strony pozwoliło to wyeliminować wpływ efektu

skali na uzyskiwane rezultaty, z drugiej zaś wymagało specjalistycznego sprzętu badawczego do realizacji dużych wymuszeń. Badania wykonano na dwóch typach belek, różniących się wysokością środka części stalowej przekroju, po to by uzyskać różne położenia środka ciężkości przekroju stalowego względem osi ciężkości przekroju zespolonego, tym samym by uzyskać różne wartości sił rozwarstwiających w łącznikach. Zbadano dwie belki o tzw. wysokim środku i jedną belkę o tzw. niskim środku. Brak możliwości obserwacji rozwoju pęknięć zmęczeniowych zębów stalowych komplikował prowadzenie badań, dlatego w belkach z tzw. wysokim środkiem wbudowano kanały obserwacyjne. Były to odcinki rur stalowych, punktowo przyspawane do listwy stalowej. Przez te kanały, przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, prowadzono obserwacje rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Dodatkowo w badaniach wykorzystano czujniki elektrooporowe oraz indukcyjne do pomiarów między innymi odkształceń zębów stalowych i ugięć belki zespolonej.

Rezultaty z tensometrów naklejonych na belki stalowe wskazały, że do momentu pojawienia się rysy zmęczeniowej w łączniku stalowym typu MCL albo do momentu osiągnięcia przez rysy granicznej długości, zmienności odkształceń w punkcie krytycznym stalowych zębów były prawie stałe wraz ze wzrastającą liczbą cykli obciążenia. Zatem dla belek niezarysowanych, jak i zarysowanych, lecz gdy rysa nie przekracza pewnej długości, stan naprężeń w obrębie stalowego łącznika jest prawie stały. Gdyby w belce bez pęknięć zmęczeniowych, układ naprężeń w łączniku stalowym ulegał zmianie wraz z kolejnymi obciążeniami, dotychczasowe procedury obliczeniowe nośności łączników stalowych mogłyby być bardziej skomplikowane.

Badania doświadczalne belek zespolonych dowiodły, że trwałość zmęczeniowa łączników stalowych typu MCL jest większa, jak łączników stalowych typu PZ, często stosowanych w budownictwie do momentu opracowania kształtu linii MCL.

Po rozcięciu i rozkuciu przebadanych belek, zaobserwowano dwa mechanizmy zniszczenia zmęczeniowego łączników stalowych z wycięciem typu MCL, spowodowane propagacją pęknięć: rozerwanie stopki stalowej oraz wyrwanie zęba stalowego, co dowodzi tezie drugiej. Rysy najczęściej inicjowały się w obszarach górnych i dolnych karbów geometrycznych, gdzie występowały koncentracje głównych naprężeń rozciągających. Inicjacja rysy w górnym karbie geometrycznym wskazała na utwierdzenie zęba w części betonowej. Zarówno miejsca powstawania rys zmęczeniowych, jak i ich kąty propagacji potwierdzono w analizach numerycznych modeli belkowych. Należy podkreślić, że na kierunek propagacji rys mogły mieć wpływ czynniki, których nie można uwzględnić

w modelu obliczeniowym, jak np. mikrowgłębienia na powierzchni cięcia kształtu, czy nieciągłości materiałowe stali.

Analizie szczegółowej poddano proces rozwoju pęknięć w modelu zniszczenia, w wyniku wyrwania zęba, w którym główna rysa propagująca w kierunku stopki stalowej zmieniała kierunek rozwoju, powodując wyrwanie zęba. Przeprowadzono etapowe obliczenia numeryczne pęknięć pojedynczych oraz wszystkich pracujących zębów, w których modelowano rysy w miejscach maksymalnych naprężeń rozciągających, o kierunkach propagacji i maksymalnych długościach pomierzonych w doświadczeniu. Stwierdzono, że inicjacja rysy zmęczeniowej w górnej, tylnej części zęba następowała wtedy, gdy długość głównej rysy po drugiej stronie zęba, w karbie dolnym nie przekraczała pewnej, granicznej długości. Po osiągnięciu przez te dwie rysy pewnych długości, układ trajektorii głównych naprężeń rozciągających w zębie stalowym ulegał wyraźnej zmianie. Rysa w dolnym karbie ulegała zakrzywieniu, co w konsekwencji prowadziło do wyrwania zęba stalowego. Wniosek ten dowiódł prawdziwości trzeciej tezy. Proces inicjacji i propagacji pęknięć w zębie stalowym podzielono na trzy etapy, uwzględniające wzajemne oddziaływanie dwóch rys zmęczeniowych. Zaproponowano kształt krzywej propagacji rysy głównej (w dolnym karbie geometrycznym), której fazy rozwoju przebiegały inaczej, jak dla rys obserwowanych w konstrukcjach stalowych. W przypadku analizowanego pęknięcia łącznika nie występowała faza tzw. kruchego pęknięcia. Zjawisko to również potwierdzono w badaniach metalograficznych pęknięć zmęczeniowych.

W pracy przeprowadzono obliczenia analityczne propagacji pęknięć zębów stalowych. Otrzymane rezultaty były znacząco mniejsze od pomierzonych w badaniach doświadczalnych i zależały głównie od przyjmowanych wartości wzrostu pęknięcia w kolejnych etapach propagacji. Warto podkreślić, że w przypadku konstrukcji zespolonych, wpływ betonu otaczającego łączniki stalowe może być znaczący, jednak wciąż nie jest rozpoznany. Wzory analityczne, wg których wykonano obliczenia, zostały opracowane na podstawie doświadczeń cyklicznych przeprowadzanych dla elementów stalowych.

Zachowanie się łącznika stalowego w innowacyjnym zespoleniu belki stalowo–betonowej jest złożone w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej. Zależy ono od złożonego stanu naprężeń na styku stal – beton, który z kolei ulega zmianie wraz z propagacją rysy, a także pojawieniem się oddzielnej rysy w zębie stalowym. Należy w przyszłości rozważyć opracowanie badań zmęczeniowych, w których oprócz odpowiedniego wyteżenia łączników, należy zapewnić możliwość ciągłej obserwacji łączników stalowych w trakcie obciążeń.