

Mechanisms of fatigue cracking in continuous perfobond strip connectors in steel-concrete composite structures

Mechanizmy pękania zmęczeniowego ciągłych łączników listwowych w konstrukcjach zespolonych stalowo-betonowych

DOI: 10.15199/33.2026.09.06

Abstract. The paper presents the mechanism of initiation and propagation of fatigue cracks in continuous strip connectors used in steel-concrete composite structures. Selected results of experimental investigations performed on POST and NPOT specimens as well as on composite beams with PZ-type connectors are discussed. Particular attention was focused on the behaviour of composite beams subjected to bending, since they most accurately reflect the actual stress state of the connectors resulting from the simultaneous action of normal stresses caused by bending and longitudinal shear stresses. It was demonstrated that fatigue cracks initiate in the regions of geometric notches located at the base of the steel teeth, while their further propagation depends on the geometry of the element, the local stress distribution and the manufacturing technology.

Keywords: steel-concrete composite structures; continuous strip connectors; PZ connectors; fatigue; fatigue cracking.

Streszczenie. W artykule przedstawiono mechanizm inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych w ciągłych łącznikach listwowych stosowanych w zespolonych konstrukcjach stalowo-betonowych. Omówiono wybrane wyniki badań elementów typu POST, NPOT oraz belek zespolonych z łącznikami typu PZ. Główną uwagę poświęcono badaniom belek zginanych, ponieważ najlepiej odwzorowują one rzeczywisty stan wyężenia łączników, wynikający z jednoczesnego działania naprężeń normalnych od zginania i naprężeń od ścinania podłużnego. Wykazano, że pęknięcia inicjują się w strefach karbów geometrycznych u podstawy stalowych zębów, a ich dalszy rozwój zależy od geometrii elementu, lokalnego układu naprężeń oraz technologii wykonania.

Słowa kluczowe: konstrukcje zespolone; ciągłe łączniki listwowe; łączniki PZ; zmęczenie; pękanie zmęczeniowe.

Steel-concrete composite structures enable efficient utilisation of the mechanical properties of both materials, with steel primarily carrying tensile stresses and concrete contributing mainly to the transfer of compressive stresses. Proper composite action requires an effective shear connection capable of transferring longitudinal shear forces at the interface between the steel and concrete components. In conventional solutions, headed studs are most commonly used. An alternative is provided by continuous strip connectors, in which composite action is achieved by means of a suitably shaped steel component and concrete filling the spaces between the cut-outs. One of the earliest solutions of this type was the Perfobond strip (Figure 1), consisting of a perforated steel strip welded to the upper flange of the beam and embedded in the concrete slab [1]. Although effective, this solution was relatively labour-intensive to fabricate. The development of open continuous strip connectors simplified the fabrication process and enabled continuous force transfer along the beam length [2 ÷ 5]. In recent years, the development of continuous composite dowels

konstrukcje zespolone stalowo-betonowe umożliwiają efektywne wykorzystanie właściwości mechanicznych obu materiałów, dzięki czemu stal przejmując głównie naprężenia rozciągające, natomiast beton uczestniczy przede wszystkim w przenoszeniu naprężeń ściskających. Warunkiem prawidłowej współpracy jest zapewnienie skutecznego zespolenia, zdolnego do przenoszenia sił podłużnego ścinania na styku części stalowej i betonowej. W klasycznych rozwiązaniach stosuje się najczęściej sworznie z główkami. Alternatywą są ciągłe łączniki listwowe, w których zespolenie uzyskuje się przez odpowiednio ukształtowaną część stalową oraz beton wypełniający przestrzeń między wycięciami. Jednym z pierwszych rozwiązań tego typu był „perfobond strip” (rysunek 1), składający się z listwy stalowej z otworami, spawanej do pasa górnego belki i zabetonowanej w płycie pomostowej [1]. Rozwiązanie to było skuteczne, lecz technologicznie pracochłonne. Rozwój ciągłych łączników otwartych umożliwił uproszczenie technologii oraz uzyskanie korzystnego, ciągłego przekazywania sił na długości belki [2 ÷ 5]. W ostatnich latach rozwój ciągłych łączników typu composite dowels doprowadził do powstania nowych form konstrukcji zespolonych stosowanych przede wszystkim w obiektach mostowych [6]. Rozwiązania tego ty-

¹⁾ Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; slawomir.rowinski@pwr.edu.pl

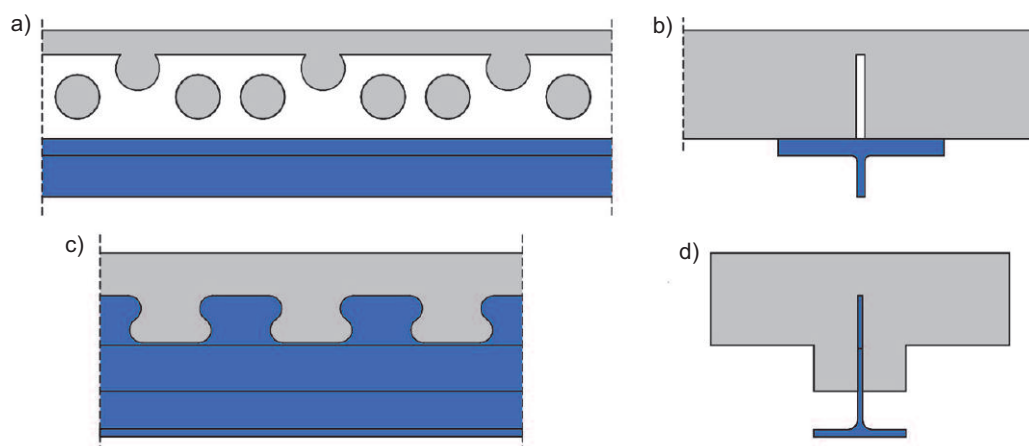


Fig. 1. Continuous strip connectors: a, b) “perfobond strip”; c, d) new-type open strip connectors PZ

Rys. 1. Ciągłe łączniki listwowe: a, b) „perfobond strip”; c, d) otwarte łączniki listwowe nowego typu PZ

has led to new forms of steel-concrete composite structures, used primarily in bridge applications [6]. Such solutions are used primarily in composite bridge structures, where durability, prefabrication, and a reduction in the number of assembly components are of particular importance. The development of strip connector geometries, including their modern MCL variants, is presented in [7, 8]. Introducing cut-out shapes into the web simultaneously creates geometric notches which, under cyclic loading, may become sites of fatigue crack initiation. Previous research has focused primarily on the static load-bearing capacity of the connection. The mechanism of fatigue failure of the steel connector teeth remains considerably less well understood.

Characteristics of PZ-type connectors

Continuous PZ-type strip connectors were fabricated by appropriately shaping the steel part of the cross-section. Composite action was provided by the steel teeth and the concrete filling the spaces between successive cut-outs. Unlike stud connectors, longitudinal shear forces were transferred continuously.

From the standpoint of fatigue behaviour, the geometry at the base of the steel tooth is of particular importance. Geometric notches occur in this region and cause local stress concentrations. Under static loading, partial stress redistribution may occur, whereas under cyclic loading even local stress concentrations can lead to fatigue crack initiation and propagation. In a composite beam, the connector is subjected to a complex stress state resulting from the combined effects of longitudinal shear and bending of the steel beam cross-section. In regions of positive bending moment, tensile and shear stresses may therefore be superimposed at the base of the tooth.

Experimental investigations of POST and NPOT specimens

The initial investigation of fatigue cracking in open strip connectors was carried out using POST specimens (“push-out standard test”) [9]. These tests enabled the local behaviour of the shear connection to be examined and indicated that the

pu wykorzystywane są przede wszystkim w mostowych konstrukcjach zespolonych, w których istotne znaczenie ma trwałość eksploatacyjna, możliwość prefabrykacji oraz ograniczenie liczby elementów montażowych. Rozwój geometrii łączników listwowych oraz ich współczesnych odmian typu MCL przedstawiono w [7, 8]. Wprowadzenie kształtów wycięć w środku powoduje jednocześnie powstanie karbów geometrycznych, które pod obciążeniem zmiennym mogą stać się miejscem inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Dotychczasowe badania koncentrowały się przede wszystkim na nośności statycznej zespolenia. Znacznie mniej rozpoznany pozostaje mechanizm zmęczeniowego zniszczenia stalowych zębów łącznika.

Charakterystyka łączników typu PZ

Ciągłe łączniki listwowe typu PZ wykonywano przez odpowiednie ukształtowanie stalowej części przekroju. Zespolenie zapewniały stalowe zęby oraz beton wypełniający przestrzeń pomiędzy kolejnymi wycięciami. W odróżnieniu od łączników sworzniowych, siły podłużnego ścinania były przekazywane w sposób ciągły.

Z punktu widzenia pracy zmęczeniowej istotna jest geometria podstawy stalowego zęba. W strefie tej występują karby geometryczne powodujące lokalne zwiększenie naprężeń. Pod obciążeniem statycznym możliwa jest częściowa redystrybucja naprężeń, natomiast pod obciążeniem cyklicznym nawet lokalne spiętrzenia mogą prowadzić do inicjacji i propagacji pęknięć. W belce zespolonej łącznik pracuje w złożonym stanie naprężeń. Przenosi lokalne oddziaływania od ścinania podłużnego, a jednocześnie jest częścią stalowego przekroju belki poddanego zginaniu. W strefie dodatnich momentów zginających u podstawy zęba może więc wystąpić superpozycja naprężeń rozciągających i ścinających.

Badania elementów typu POST oraz NPOT

Pierwsze rozpoznanie problemu pęknięcia zmęczeniowego otwartych łączników listwowych prowadzono na elementach typu POST („push-out standard test”) [9]. Badania

steel part of the connector may govern the fatigue resistance of the system. In tests with PZ connectors, fatigue cracks initiated at the roots of geometric notches [10]. After removal of the concrete, fatigue cracks propagating through the steel teeth were observed. Their propagation was nevertheless limited, which was attributed to the presence of a compressive stress zone restraining further crack growth. POST tests made it possible to identify critical locations, but they did not fully reproduce the behaviour of the connectors in beams subjected to bending. They provided only an initial insight into the problem of stress concentration and fatigue cracking of steel connectors.

NPOT specimens („new push-out test”) were designed to reproduce the stress state occurring in the positive bending-moment regions of composite beams [4]. At the base of the steel tooth, tensile stresses were superimposed on stresses resulting from longitudinal shear. Nine NPOT tests were performed. Cyclic loading was applied at frequencies ranging from 0.5 to 4.5 Hz and at load ranges of $\Delta P = 100, 160$ and 250 kN. After 2 million cycles, the specimens were cut open and the condition of the steel connectors was assessed. In some specimens, failure occurred due to cracking of the weld joining the web plates, whereas in others a fatigue crack developed in the region of the steel tooth. The results confirmed that the simultaneous action of normal and shear stresses promotes crack propagation in a direction that may lead to a local loss of load-bearing capacity.

The NPOT tests constituted an intermediate stage between a local connector test and a full-beam test. They demonstrated that a crack initiated at a geometric notch can continue to propagate when tensile stresses are present at the base of the tooth. These findings were important for assessing the applicability of continuous strip connectors in composite structures subjected to repeated cyclic loading.

Experimental investigations of composite beams

Two beam cross-section types, C1 and C2, were designed. The C1 beams (two specimens) had a high web, whereas the C2 beam (one specimen) had a lower web (Figure 2). The PZ-type connectors were cut from IPE 500 sections made of S460J2 steel using oxy-acetylene flame cutting [4]. Regions through the thickness of the steel connector beneath the load application areas were filled with expanded polystyrene to prevent the method of load application from affecting the

umożliwiała analizę lokalnej pracy zespolenia i wskazały, że stalowa część łącznika może decydować o trwałości zmęczeniowej układu. W próbach z łącznikami PZ pęknięcia inicjowały się w dnach karbów geometrycznych [10]. Po usunięciu betonu obserwowano pęknięcia zmęczeniowe rozwijające się w stalowych zębach. Ich propagacja była jednak ograniczona, co wiązano z występowaniem strefy naprężeń ściskających ograniczających dalszy rozwój pęknięcia. Badania POST pozwoliły zidentyfikować miejsca krytyczne, ale nie odwzorowywały w pełni pracy łączników w belkach zginanych. Rzuciły jedynie światło na problem koncentracji naprężeń i pękania zmęczeniowego stalowych łączników.

Elementy typu NPOT („new push-out test”) zaprojektowano w celu odwzorowania stanu naprężeń występującego w strefie dodatnich momentów zginających belek zespolonych [4]. W podstawie stalowego zęba następowała superpozycja naprężeń rozciągających oraz naprężeń od ścinania podłużnego. Wykonano dziewięć prób typu NPOT. Obciążenia cykliczne prowadzono przy częstotliwości 0,5 – 4,5 Hz oraz w przypadku $\Delta P = 100, 160$ i 250 kN. Po 2 mln cykli próbki rozcinano i oceniano stan stalowych łączników. W części elementów stwierdzono zniszczenie wskutek pęknięcia spoiny łączącej blachy środników, a w innych przypadkach rozwój pęknięcia zmęczeniowego w strefie stalowego zęba. Wyniki potwierdziły, że jednocześnie działanie naprężeń normalnych i ścinających sprzyja propagacji rys w kierunku prowadzącym do lokalnej utraty nośności.

Badania NPOT stanowiły etap pośredni między próbą lokalną a badaniem pełnej belki. Wykazały, że pęknięcie zainicjowane w karbie geometrycznym może rozwijać się dalej, jeżeli w strefie podstawy zęba występują naprężenia rozciągające. Wyniki te miały istotne znaczenie podczas oceny możliwości stosowania ciągłych łączników listwowych w konstrukcjach zespolonych poddanych obciążeniom wielokrotnie zmiennym.

Badania belek zespolonych

Zaprojektowano dwa typy przekrojów belek C1 oraz C2. Belki C1 (2 szt.) miały wysoki środnik, natomiast belka C2 (1 szt.) charakteryzowała się niższym środnikiem (rysunek 2). Łączniki typu PZ wycięto z dwuteowników IPE 500 ze stali S460J2, stosując technologię cięcia gazowego tlenowo-acetylenowego [4]. Obszary na grubości stalowego łącznika, pod powierzchnią działania obciążenia wypełniono styropia-

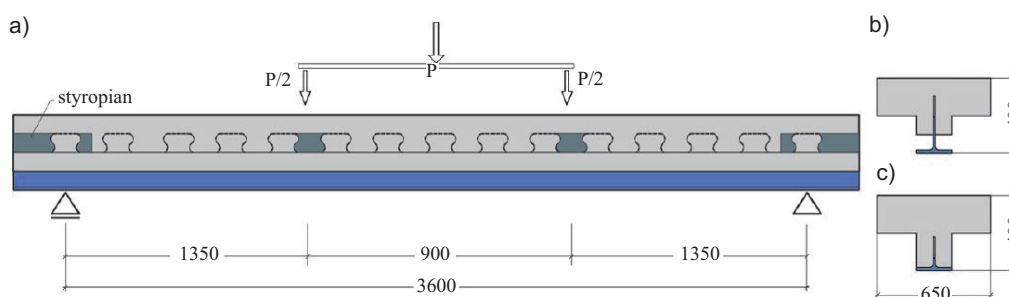


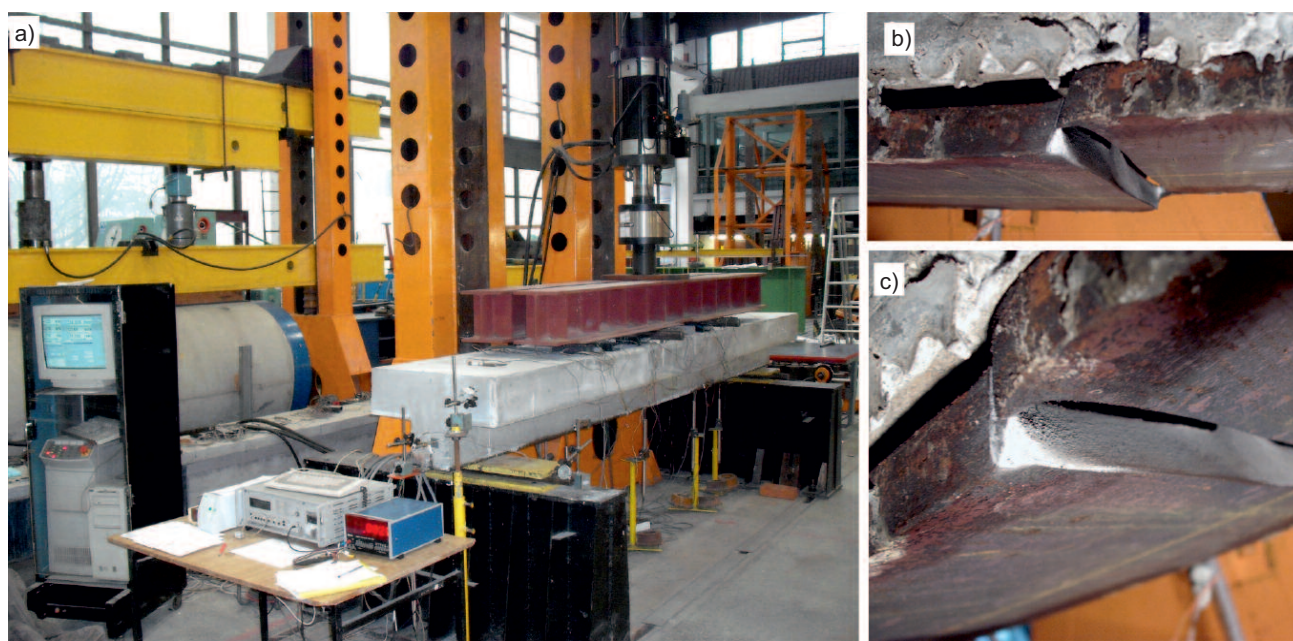
Fig. 2. Composite beams with PZ-type connectors: a) static scheme; b) cross-section of beam type C1; c) cross-section of beam type C2
Rys. 2. Belki zespolone z łącznikami typu PZ: a) schemat statyczny; b) przekrój przez belkę typu C1; c) przekrój przez belkę typu C2

stress state of the teeth. Expanded polystyrene was also used in the support regions, where the steel teeth were subjected solely to shear. Owing to the web thickness and the cross-sectional area of the steel connector, failure was expected to be governed by the steel part of the shear connection.

The use of two cross-section types made it possible to assess the influence of web geometry on stress distribution and damage development. The web height affected the stiffness of the steel component, the position of the tensile zone, and the local stress conditions in the teeth. The C2 beam test is shown in the photograph. The 3,6 m long beams were subjected to two concentrated loads spaced 0.9 m apart. The minimum load was $P_{\min} = 120$ kN and the maximum load was $P_{\max} = 280$ kN. The load range was $\Delta P = 160$ kN, and the loading frequency was 2.4 Hz.

nem, aby sposób przyłożenia sił nie wpływał na wyężenie zębów oraz w strefach podporowych, gdzie zęby stalowe są wyłącznie ścinane. Ze względu na grubość środnika i powierzchnię stalowego łącznika spodziewano się, że o zniszczeniu może decydować część stalowa zespolenia.

Dobór dwóch typów przekrojów umożliwił ocenę wpływu geometrii środnika na rozkład naprężeń i rozwój uszkodzeń. Wysokość środnika wpływała na sztywność części stalowej, położenie strefy rozciąganej oraz lokalne warunki pracy zębów. Badanie belki C2 przedstawiono na fotografii. Belki o długości 3,6 m obciążano dwiema siłami skupionymi w rozstawie 0,9 m. Minimalna wartość obciążenia wynosiła $P_{\min} = 120$ kN, a maksymalna $P_{\max} = 280$ kN. Zakres zmienności obciążenia $\Delta P = 160$ kN, natomiast częstotliwość obciążenia przyjęto jako równą 2,4 Hz.



Investigation of the composite beam type C2: a) the test setup with the beam; b, c) fatigue crack – flange rupture
Badanie belki zespolonej typu C2: a) stanowisko badawcze wraz z belką; b, c) pęknięcie zmęczeniowe – rozerwanie stopki

Electrical resistance strain gauges were bonded to the steel teeth at locations where the highest stress concentrations were expected. They enabled local strains to be recorded. Beam deflections were measured using inductive displacement transducers. The tests were continued until 2 million cycles had been reached or until failure occurred. The C2 beam failed suddenly after approximately 1.2 million cycles. Failure occurred as a result of rupture of the lower flange of the steel I-section. The nature of the crack indicated an unfavourable combination of local stress concentration and global tensile stresses in the steel component.

The two C1 beams did not undergo complete failure and sustained the prescribed 2 million load cycles. After completion of the tests, the specimens were cut open and the concrete was removed, exposing the steel connectors. Fatigue cracks were identified in both beams in the vicinity of the geometric notches of the PZ shape (Figure 3).

In beam C2/3SC, cracks occurred in teeth Nos. 2, 4', 3' and 2'. In beam C1/5SC, they were observed in teeth 2, 3, 4, 4' and 3', whereas in beam C1/6SC they occurred in teeth 2, 3, 4, 4',

W miejscach spodziewanych największych koncentracji naprężeń, na stalowych zębach przyklejono tensometry elektrooporowe. Umożliwiały one rejestrację odkształceń lokalnych. Ugięcia belek mierzono czujnikami indukcyjnymi. Badania prowadzono do osiągnięcia 2 mln cykli lub do wystąpienia zniszczenia. Belka typu C2 uległa nagłemu zniszczeniu po ok. 1,2 mln cykli. Zniszczenie nastąpiło wskutek rozerwania stopki dolnej stalowego teownika. Charakter pęknięcia wskazywał na niekorzystne połączenie lokalnej koncentracji naprężeń i globalnego rozciągania części stalowej.

Dwie belki typu C1 nie uległy całkowitemu zniszczeniu i przeniosły projektowane 2 mln cykli. Po zakończeniu badań elementy rozcięto i rozkuto, co pozwoliło odsłonić stalowe łączniki. W obu belkach stwierdzono pęknięcia zmęczeniowe w rejonie karbów geometrycznych kształtu PZ (rysunek 3).

W belce C2/3SC pęknięcia występowały w zębach nr 2, 4', 3' i 2'. W belce C1/5SC zaobserwowano je w zębach 2, 3, 4, 4' i 3', natomiast w belce C1/6SC w zębach 2, 3, 4, 4', 3'

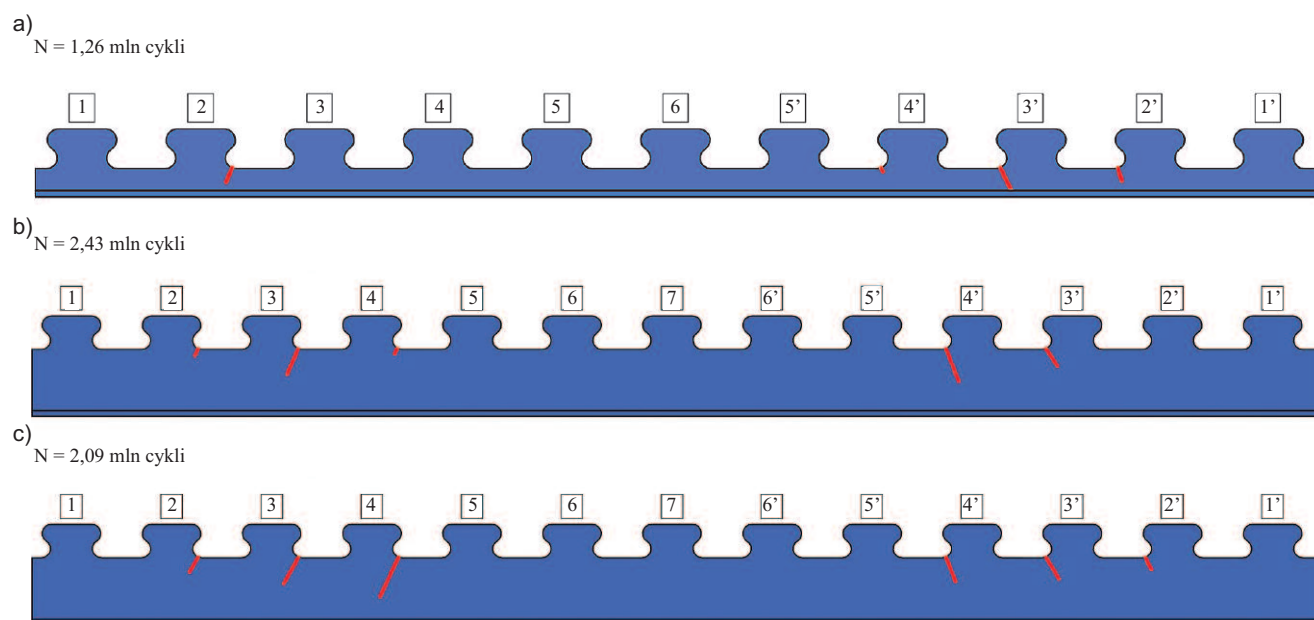


Fig. 3. The webs of beams: a) C2/3SC; b) C1/5SC; c) C1/6SC with schemes of the observed cracks

Rys. 3. Środek belek: a) C2/3SC; b) C1/5SC; c) C1/6SC ze schematami zaobserwowanych rys

3' and 2'. The crack distribution confirmed that the geometric-notch regions are critical locations with respect to fatigue resistance. Crack initiation was usually located approximately 10 mm from the notch fillet. The propagation direction was inclined relative to the vertical axis. In the span region, the angle was approximately 25°, whereas in the support region it was approximately 30°. The difference in propagation angle indicates the influence of the internal-force distribution. Shear force played a greater role in the support region, whereas in the span region the bending moment additionally affected the stress state. The crack propagation direction was governed by the local stress state in the vicinity of the geometric notch.

The beam tests confirmed that fatigue cracks in PZ-type connectors initiate at locations of the highest stress concentration. Importantly, in a beam subjected to bending, the local action of the shear connection is superimposed on the global stresses resulting from the behaviour of the entire cross-section. In the C1 beams, the cracks did not lead to loss of load-bearing capacity during the test programme. This does not, however, imply the absence of fatigue degradation. In the C2 beam, the failure mechanism was less favourable. The lower web and the associated cross-sectional geometry caused the propagating crack to ultimately result in rupture of the flange of the steel I-section. This result confirms that a local crack in the connector region can develop into failure of the load-bearing member. Microscopic examination of the crack in the C2 beam revealed fatigue fractures with multiple crack-initiation sites. One of the identified causes was an unfavourable material microstructure resulting from the fabrication process used to produce the geometric profile, in particular flame cutting [11]. This finding highlights the influence of edge quality and the condition of the surface layer on the fatigue resistance of the connector. A similar influence of cutting technology on the fatigue resistance of steel structures was demonstrated in [12].

i 2'. Rozmieszczenie pęknięć potwierdziło, że strefy karbów geometrycznych są miejscami krytycznymi z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej. Początek rys lokalizował się zwykle ok. 10 mm od punktu wyokrąglenia karbu. Kierunek propagacji był nachylony względem osi pionowej. W części przęsłowej kąt wynosił ok. 25°, a w strefie podporowej ok. 30°. Różnica kąta propagacji wskazuje na wpływ układu sił wewnętrznych. W strefie podporowej większe znaczenie miała siła tnąca, natomiast w części przęsłowej dodatkowo występował wpływ momentu zginającego. Kierunek propagacji pęknięcia wynikał z lokalnego stanu naprężeń w rejonie karbu geometrycznego.

Badania belek potwierdziły, że pęknięcia zmęczeniowe łączników typu PZ inicjują się w miejscach największej koncentracji naprężeń. Istotne jest jednak to, że w belce zginanej lokalne oddziaływanie zespolenia nakłada się na globalne naprężenia od pracy całego przekroju. W belkach C1 pęknięcia nie doprowadziły do utraty nośności w trakcie programu badawczego. Nie oznacza to jednak braku degradacji zmęczeniowej. W belce C2 mechanizm był bardziej niekorzystny. Niższy środek i związana z tym geometria przekroju spowodowały, że propagacja pęknięcia doprowadziła do rozerwania stopki stalowego teownika. Wynik ten potwierdza możliwość przejścia od lokalnego pęknięcia w strefie łącznika do zniszczenia elementu nośnego. Badania mikroskopowe pęknięcia belki C2 wykazały obecność wieloogniskowych złomów zmęczeniowych. Jako jedną z przyczyn wskazano niekorzystną strukturę materiału powstałą w wyniku technologii wykonania profilu geometrycznego, przede wszystkim cięcia gazowego [11]. Wynik ten podkreśla wpływ jakości krawędzi i stanu warstwy wierzchniej na trwałość zmęczeniową łącznika. Podobny wpływ technologii cięcia na odporność zmęczeniową konstrukcji stalowych wykazano w [12].

Conclusions

The investigations of POST and NPOT specimens and composite beams with continuous PZ-type strip connectors enabled the mechanism of fatigue crack initiation and propagation in the steel part of the shear connection to be identified. It was demonstrated that the failure process begins with a local stress concentration in the region of geometric notches at the bases of the steel teeth, followed by microcrack propagation. Subsequent crack growth is governed by the local stress field. POST tests made it possible to identify crack-initiation sites, but did not fully reproduce the actual behaviour of the connectors in members subjected to bending. Only the NPOT tests and composite-beam tests confirmed the significant influence of the simultaneous action of tensile stresses and stresses due to longitudinal shear on the development of fatigue damage.

The composite-beam tests demonstrated that fatigue cracks can develop under the actual stress conditions of a structural member. The C1 beams sustained the prescribed 2 million load cycles, but cutting open the specimens revealed fatigue cracks in the steel teeth of the connectors. In the C2 beam, crack propagation led to failure of the member after approximately 1.2 million cycles as a result of rupture of the lower flange of the steel I-section. It was also found that the crack propagation direction depended on the local stress distribution and was approximately 25° in the span region and approximately 30° in the support region.

The results indicate that the design of structures with continuous strip connectors should not be limited solely to verification of the static load-bearing capacity of the shear connection. In structures subjected to repeated cyclic loading, local fatigue effects occurring in geometric-notch regions must also be taken into account. Connector fabrication technology is likewise important, because thermal cutting may cause local changes in the material microstructure and reduce the fatigue resistance of the member. Particular attention should therefore be paid, in both design and fabrication, to the quality of cut edges, notch radii, and any finishing treatment of the notch regions.

Photos: author

Received: 10.03.2026

Revised: 12.05.2026

Published: 23.09.2026.

Wnioski

Przeprowadzone badania elementów typu POST, NPOT oraz belek zespolonych z ciągłymi łącznikami listwowymi typu PZ umożliwiły identyfikację mechanizmu inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych w stalowej części zespolenia. Wykazano, że proces zniszczenia rozpoczyna się od lokalnego spiętrzenia naprężeń w rejonie karbów geometrycznych (u podstawy stalowych zębów), następnie dochodzi do propagacji mikropęknięcia. Dalszy rozwój pęknięcia przebiega zgodnie z lokalnym polem naprężeń. Badania POST pozwoliły wskazać miejsca inicjacji pęknięć, ale nie odwzorowywały w pełni rzeczywistej pracy łączników w elementach zginanych. Dopiero badania NPOT oraz belek zespolonych potwierdziły istotny wpływ jednoczesnego działania naprężeń rozciągających i naprężeń od ścinania podłużnego na rozwój uszkodzeń zmęczeniowych.

W badaniach belek zespolonych wykazano, że pęknięcia zmęczeniowe mogą rozwijać się w rzeczywistym układzie pracy elementu konstrukcyjnego. Belki typu C1 przeniosły zakładane 2 mln cykli obciążenia, ale po rozcięciu elementów ujawniono obecność pęknięć zmęczeniowych w stalowych zębach łączników. W przypadku belki C2 rozwój pęknięcia doprowadził do zniszczenia elementu po ok. 1,2 mln cykli wskutek rozerwania stopki dolnej stalowego teownika. Stwierdzono również, że kierunek propagacji pęknięć zależał od lokalnego rozkładu naprężeń i wynosił ok. 25° w części przęsłowej oraz ok. 30° w strefie podporowej.

Uzyskane wyniki wskazują, że projektowanie konstrukcji z ciągłymi łącznikami listwowymi nie powinno ograniczać się wyłącznie do sprawdzenia nośności statycznej zespolenia. W konstrukcjach narażonych na obciążenia wielokrotnie zmienne konieczne jest uwzględnienie lokalnych efektów zmęczeniowych występujących w strefach karbów geometrycznych. Istotne znaczenie ma również technologia wykonania łączników, ponieważ cięcie termiczne może powodować lokalne zmiany strukturalne materiału i zmniejszać odporność zmęczeniową elementu. W projektowaniu i wykonawstwie należy zatem zwracać szczególną uwagę na jakość krawędzi wycięć, promienie wyokrągłeń oraz ewentualną obróbkę stref karbów.

Fotografie: autor

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.03.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 12.05.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Leonhard F. et al. New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength, Beton- und Stahlbetonbau, 1987.
- [2] Lorenc W. Nośność ciągłych łączników otwartych w zespolonych konstrukcjach stalowo-betonowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [3] Hechler O, Lorenc W, Seidl G, Viehues E. Continuous shear connectors in bridge construction, Composite Construction VI Conference, Colorado, 2008.
- [4] Seidl G et al. PreCo-Beam: Prefabricated Enduring Composite Beams based on Innovative Shear Transmission, Final Report, European Commission, 2011.
- [5] Zapfe C. Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2001.
- [6] Lorenc W. Composite Dowels: the Way to the New Forms of Steel-Concrete Composite Structures. In: Synergy of Culture and Civil Engineering – History and Challenges. IABSE Symposium Wrocław 2020, Wrocław, Poland, 7–9 October 2020; pp. 98 – 138.

- [7] Lorenc W, Seidl G, Berthelley J. The evolution of the shape of composite dowels. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2022; 44 (4): 296 – 316.
- [8] Lorenc W, Koźuch M. Development of the modified clothoidal (MCL) shape of composite dowels against the background of fatigue and technological issues. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2024; 46 (2): 91 – 110.
- [9] Seidl G. Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders, Raport PRE nr 4/2009, Politechnika Wrocławska, 2009.
- [10] Berthelley J, Lorenc W, Mensinger M, Ndogomo J, Seidl G. Zum Tragverhalten von Verbunddübeln – Teil 2: Ermüdungsverhalten, Stahlbau, vol. 80, nr 4, 2011.
- [11] Dudziński W, Pękalski G, Harnatkiewicz P, Kopczyński A, Lorenc W, Koźuch M, Rowiński S. Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011; vol. XI, nr 4, s. 839 – 858.
- [12] Rowiński S. Effect of Steel-Cutting Technology on Fatigue Strength of Steel Structures, *Materials*. 2021, vol. 14, nr 20, art. 6097, s. 1-15.