

Jerzy Jasieńko*, Tomasz Nowak*, Anna Karolak*

Historyczne złącza ciesielskie

Historical carpentry joints

Słowa kluczowe: konstrukcje drewniane, połączenia ciesielskie, znaki ciesielskie, połączenia czopowe, połączenia wrębowe, połączenia stykowe, analiza pracy statycznej połączeń, wzmocnienia połączeń

Key words: timber structures, carpentry joint, carpenter's marks, mortise and tenon joints, notched joints, scarf joints, analysis of static behavior of joints, reinforcement of joints

1. WPROWADZENIE – RYS HISTORYCZNY

Rozwój budownictwa drewnianego uwarunkowany był dobrymi parametrami wytrzymałościowymi drewna oraz jego szeroką dostępnością. Wznoszono budynki od obwarowań, poprzez domy i budowle sakralne, aż po wielkie obiekty inżynierskie. Kluczowym zagadnieniem w kształtowaniu tych obiektów było wykonywanie połączeń, które zespalały elementy budynku w całość, zapewniały przenoszenie sił i niejednokrotnie świadczyły o wysoko rozwiniętej technice i kunszcie budowniczych. Budowle z drewna były tworzone już w epoce kamienia i brązu za pomocą ówczesnych prostych narzędzi. Na uwagę zasługują najstarsze drewniane mosty (np. most na Renie z 55 r. p.n.e. czy most Trajana przez Dunaj ze 105 r.). Najstarsze zachowane w Europie obiekty to domy o drewnianym szkielecie wypełnionym deskami i plecionką (IX w.) i domy z bali o konstrukcji zrębowej ścian (X–XII w.). Pierwsze połączenia w tych domach to połączenia trzpieniowe i klinowe. Łączniki wykonywano z drewna twardszego, np. dębowego lub jesionowego. W grodzie Radzim pochodzącym z IX/X w. odkryto pierwsze połączenia czopowe [1]. W pierwszych domach szkieletowych z XIII w. stosowano połączenia czopowe wzmocniane klinami, połączenia wrębowe z czopami i w kształcie jaskółczego ogona. Między XIII a XVII w. nastąpił znaczny rozwój sztuki ciesielskiej i powstały nowe typy konstrukcji więźby, m.in. w gotyckich dachach i barokowych kopułach oraz nowe formy połączeń [1]. Od XVII w. na pograniczu Niemiec, Czech i Polski wznoszono tzw. domy przy-

1. INTRODUCTION – HISTORICAL BACKGROUND

Development of timber construction has always depended on good wood strength properties and ready access to wood material. Timber structures constructed range from defence walls to houses and sacral buildings through to large engineered structures. A key factor in building construction related to the performance of joints, which held together building elements as a single structure and ensured the transfer of forces, demonstrating in many cases highly developed technical expertise and craftsmanship. Wooden structures were being built as long ago as the Stone and Bronze Ages using simple tools that were available at the time. The oldest wooden bridges are especially noteworthy (e.g. bridge across the Reine dated at 55 BC or Trajan's bridge across the Danube dated at 105 AD). The oldest timber buildings preserved in Europe are wooden-framed longhouses filled with planks and braids dating from the 9th century and loghouses based on wall-framed crowned construction dating from the 10th–12th centuries. The earliest joint-types in these buildings were dowel and cotter joints. Joints were made from harder wood, e.g. oak or ash. The first mortise and tenon joints were discovered in the castle-town of Radzim dating back to the 9th and 10th centuries [1]. The first wood-frame house constructions dating back to the 13th century included mortise and tenon joints, strengthened with wedges, notched joints with tenons and dovetail joints. Wood craftsmanship developed significantly between the 13th and 17th centuries with new types of roof structures, incl. gothic roofs and baroque

* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

* Wroclaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering

słupowe, gdzie dolne kondygnacje wykonywane były jako konstrukcje zrębowe z połączeniami czopowymi i wrębowymi [2]. Kolejne lata to konstrukcje dachowe o dużych rozpiętościach, oparte często na formie łuku [3]. Stosowanie wielu elementów składowych prowadziło do konieczności wytworzenia wielu połączeń, co było problematyczne. Dlatego do powszechnego użycia weszły łączniki metalowe.

W Polsce od okresu średniowiecza aż do teraz stosowane są rozwiązania ciesielskie. W domach wznoszono przede wszystkim ściany wieńcowe (zrębowe) i sumikowo-łątkowe (ryc. 1), w budynkach gospodarczych ściany szkieletowe z wypełnieniem. Ustroje dachowe to najczęściej wiązary krokwiowe lub jętkowe [4] (ryc. 2). Bardziej skomplikowane więźby wznoszono w obiektach sakralnych, które wymagały takich rozwiązań ze względu na większe rozpiętości. Do najstarszych zachowanych przykładów zalicza się więźbę dachową kościoła św. Jakuba w Toruniu, pochodzącą z początku XVI w., ze złączami nakładkowymi w formie jaskółczego ogona [5]. Od poł. XV w. do przełomu wieków XVIII i XIX powszechnie stosowana była storczykowa więźba dachowa [6].

Złożone więźby dachowe wymagały wprowadzenia systemu oznaczeń, który pozwalał na identyfikację poszczególnych elementów, właściwego ich położenia względem siebie oraz ich miejsca w całej konstrukcji [7]. Przykład oznaczeń ciesielskich na historycznej więźbie dachowej, datowanej na podstawie badań dendrochronologicznych na rok 1492, kościoła Najświętszej Marii Panny w Ingolstadt pokazany jest na ryc. 3.

domes, as well as new types of joints [1]. From the 17th century, so-called Upper Lusatian houses were built in the borderlands of Germany, Bohemia and Poland, in which the lower floors were constructed as timber frames held together with mortise and tenon joints and notched joints [2]. In subsequent years, attention focused on large span roof structures, shaped often as arches [3]. Making use of many elements created a need for many joints, which became problematic. For this reason metal joints came to be used extensively.

Carpentry solutions have been applied in Poland from the Middle Ages until today. Crowned and bonded constructions were used especially in houses (fig. 1), whereas wood-frame constructions with filling were used in outbuildings. Roof structures were most common in the form of rafter or collar beam roofs [4] (fig. 2). More complicated roof structures were used in sacral architecture, the need for which arose from the larger surface spans involved. One of the oldest examples preserved is that of the roof structure of the Church of St. Jacob in Torun, dating from the 16th century, which includes notched joints with dovetail tenons [5]. From the second half of the 15th century to the turn of the 18th and 19th centuries king post roof structures became common [6].

Installing more complex roof structures required a system of markings, which enabled identification of individual elements, indicating their location in relation to other elements and their place in the structure as a whole [7]. An example of carpenter's marks on an historical roof structure in Our Lady's Church in Ingolstadt, dated dendrochronologically to the year 1492 is shown in fig. 3.



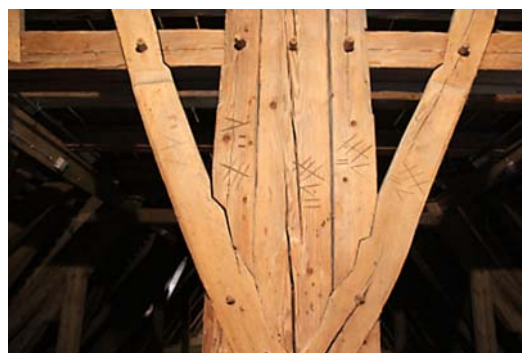
Ryc. 1. Karczma z Sochocina (XVIII w.) z konstrukcją ścian sumikowo-łątkową i chałupa z Rebowo (1875 r.) z konstrukcją zrębową ścian

Fig. 1. The Inn in Sochocin (18th century) with bonded construction walls and the cottage in Rebowo Village (1875) with crowned construction



Ryc. 2. Więżba dachowa jętkowa chałupy z Rebowo (1875 r.)

Fig. 2. A collar beam roof structure in the cottage in Rebowo Village (1875)



Ryc. 3. Znaki ciesielskie na elementach więźby kościoła NMP w Ingolstadt (XV w.)

Fig. 3. Carpenter's marks on elements of the roof structure of Our Lady's Church in Ingolstadt (15th century)

Połączenia ciesielskie to połączenia kształtowane. Zapewniają przenoszenie obciążeń z elementu na element oraz odpowiednie położenie elementów względem siebie. Utrzymują także zdolność do przenoszenia obciążeń po demontażu i powtórny montaż, co stanowi ważną cechę z punktu widzenia prac remontowych i konserwatorskich. Doskonałym tego przykładem może być Świątynia Wang, wybudowana na przełomie XII i XIII w. w Norwegii, przeniesiona w XIX w. do Karpacza, gdzie znajduje się dzisiaj. W kościele wszystkie połączenia zrealizowano za pomocą drewnianych złączy ciesielskich, bez użycia gwoździ, co pozwoliło na demontaż konstrukcji i ponowne jej wzniesienie w innym miejscu.

W [8] pokazano istotność badania zagadnienia połączeń ciesielskich w kontekście analizy całej konstrukcji (tab. 1).

Carpentry joints are customised. This is to assure loading is transferred from one element to another and that elements are appropriately positioned with respect to one another. The capability of transferring loading is retained after disassembly and reassembly, which is an important feature from the perspective of renovation and conservation work. An excellent example in this respect is the Wang Church built at the turn of the 12th century in Norway and transported to Karpacz in the 19th century, where it is to this day. All joints used in the church were wood carpentry joints without nails, which enabled disassembly and reassembly in a new location.

The significance of researching carpentry joints in the context of the whole construction is presented in [8] (tab. 1).

Tab. 1. Zagadnienia dotyczące analizy historycznych konstrukcji

Tab. 1. Problems related to structural analysis of timber constructions

Zagadnienie <i>Problem</i>	Wpływ na wynik <i>Influence on result</i>	Uwagi <i>Remarks</i>
przestrzenny schemat przekazywania sił (redystrybucji) <i>schematic of structural load transfer (redistribution)</i>	tym większy, im większy stopień skomplikowania konstrukcji <i>the more complicated the structure, the greater the impact</i>	stąd wnioskować można, w jaki sposób poszczególne elementy są obciążane <i>It is possible to conclude which elements are subject to which type of loading</i>
kształtowanie podpór <i>form of supports</i>	częściowo znaczny wpływ <i>significant influence in part</i>	zwykle trudne do ustalenia <i>Usually difficult to determine</i>
połączenia ciesielskie <i>carpentry joints</i>	z reguły duży wpływ na wynik <i>usually high influence</i>	Eurokod 5 [9] zaleca uwzględniać w obliczeniach i analizie podatność, mimośrodowość; podatność połączeń wpływa znacząco na przebieg sił wewnętrznych; normy i literatura nie są w tym względzie kompletne <i>According to Eurocode 5 [9] it is recommended to take into account flexibility and eccentricity of joints in calculations; the flexibility of carpentry joints affects significantly the transfer of internal structural forces; technical standards and literature on the subject are incomplete in this regard</i>
przyjęte parametry materiałowe <i>material parameters assumed</i>	średni wpływ na wynik <i>medium influence</i>	zagadnienie złożone ze względu na anizotropowość materiału i różne parametry wytrzymałościowe przy ściskaniu i rozciąganiu <i>complex problem due to the anisotropy of material and different strength parameters during compression and tensiling</i>
wymiary przekroju poprzecznego <i>dimensions of transverse cross – section</i>	niewielki wpływ na wynik <i>small influence</i>	przekroje elementów poza złączami zwykle mają za duże wymiary* <i>Dimensions of cross-sections of elements apart from joints are often oversized*</i>
dalsze efekty <i>further effects</i>	częściowo nieznanne <i>partly unknown</i>	deformacje wynikające z pelzania, zmiany objętości wskutek zmian wilgotności <i>deformations due to creep and volume changes resulting from changes in moisture</i>

* Połączenia ciesielskie osłabiają przekroje elementów łączonych, które muszą mieć wymiary takie, by przenosiły powstałe naprężenia. Stąd przekroje elementów poza złączami mają z reguły większe wymiary niż wynika to z warunków wyężenia, co wpływa na zwiększenie sztywności konstrukcji.

Uwaga: Tabela wykonana na podstawie niepublikowanych materiałów CH.ESS 2013: The Role of Timber in Construction – between Tradition and Innovation (Meisel, Schickhofer).

* *Carpentry joints weaken the cross-sections of elements being joined. They must be of a dimension that enables transfer of structural loadings arising. This is why elements apart from joints have typically larger dimensions than would appear warranted by loading conditions and which contribute to increasing the rigidity of the structure.*

Please note: The table was prepared on the basis of unpublished materials CH.ESS 2013: The Role of Timber in Construction – between Tradition and Innovation (Meisel, Schickhofer).

Zachowanie statyczne połączeń wpływa w znaczący sposób na siły wewnętrzne w modelu statycznym, dlatego, aby przeprowadzić dokładną analizę całej konstrukcji, należy dokonać analizy zachowania połączeń (z uwzględnieniem podatności i mimośrodków).

Static behavior of joints significantly influences internal forces of the static model, which is why carrying out a detailed analysis of the whole structure requires analysis of joints (taking into account their flexibility and eccentricity).

2. TYPY POŁĄCZEŃ

W konstrukcjach historycznych istnieje kilkaset typów połączeń ciesielskich [10], które kształtowały się w wyniku doświadczenia cieśli danego obszaru czy okresu. Dokonuje się różnych podziałów połączeń, w zależności od ich formy na trzpieniowe, klejowe i wrębowe [11], pod względem pełnionej funkcji na przedłużające, zwiększające wymiary, zespalające elementy [12] itd.

2.1. Połączenia ścienne

W konstrukcjach drewnianych ścian wyróżnia się m.in. wieńcowe (zrębowe), szkieletowe (ryglowe) i sumikowo-łątkowe.

Ściany o konstrukcji wieńcowej są najczęściej stosowanym typem w historycznych obiektach drewnianych w budownictwie wiejskim i małomiasteczkowym w Polsce. Istnieje kilkanaście różnych rodzajów połączeń elementów ścian wieńcowych w narożach, nazywanych węglami [5], z osłatkami i bez (ryc. 4). Złącza z osłatkami były prostsze i tworzyły naroża mocne statecznie. Były to zakładki proste lub w jaskółczy ogon. Złącza bez osłatek wykonywano jako zakładki proste lub ukośne.

W obiektach historycznych w Polsce najbardziej powszechne są, nazwane tradycyjnie od regionów występowania, zamek węglowy podhalański i słowiański. Zamek węglowy podhalański zaczął pojawiać się w Polsce już w XV–XVI w., np. w XV-wiecznym drewnianym kościółku z Dębna [5]. Zamek węglowy podhalański jest formą połączenia na nakładkę wzmocnionego klinowatymi wypustami (tab. 2), przez co staje się sztywny i wytrzymały. Połowizny w ścianie łączone są między sobą na twarde drewniane kołki. Zamek słowiański to zamek pletwowy (tab. 2). Nie jest to rozwiązanie tak estetyczne ani korzystne, jak w zamkach podhalańskich. Z powodu braku osłatek charakteryzowały się one gorszą izolacyjnością termiczną – przemarzały w narożach ze względu na wyższy współczynnik przenikania ciepła dla drewna wzdłuż niż w poprzek włókien.

W innych rozwiązaniach (tab. 2) belki również łączone były w narożnikach na nakładki lub zamki, a spoczywające jeden na drugim wieńce między sobą kołkami. Rzadszym rozwiązaniem, w przypadku dłuższych ścian i zastosowania słupów pionowych, jest łączenie ich na czop z podwaliną i górną belką [13]. Ściany wewnętrzne łączono ze ścianami zewnętrznymi w jaskółczy ogon lub na nakładki, jak w narożach.

Rozkwit budownictwa szkieletowego, znanego od ponad tysiąca lat, przypada na XV i XVI w. [5]. W Polsce, poza rejonami Pomorza, Warmii, Mazur i Śląska, system ten nie był tak powszechnie stosowany, jak w Niemczech, Francji i Anglii [14], [15].

Konstrukcja połączeń w tego typu ustrojach wyglądała następująco (ryc. 5):

- belki podwalinowe ułożone na podmurówce na całej długości łączone były w narożach na zamek pletwowy (zwany też tyrolskim), w nakładkę prostą kołkowaną lub zamek francuski;

2. JOINT TYPES

Historical structures include several hundred different types of carpenter's joints [10], which were developed through the experience gained by carpenters in a specific area or time-period. Joints are classified in different ways, depending on their form: dowel, glued and notched [11] or their function: extending, increasing dimensions, integrating elements [12] etc.

2.1. Wall joints

In wooden wall structures, the following joints are distinguished *inter alia*: crowned, framed (bolted) and bonded.

Crowned construction of walls is the most common type used in historical timber buildings in Poland's rural areas and small towns. There are a dozen or so different types of joints connecting crowned walls at their corners called quoins [5], with and without protrusions left at the corners (fig. 4). Joints with protrusions were simpler and created statically strong corners. These joints were half lap or dovetail joints. Joints without any protrusions were made as half lap or skewed joints.

The two most common types of joints used in historical buildings in Poland were named after the regions where they originated: Podhale quoined lap joint and Slavic lap joint. The Podhale quoined lap joint started to be used in Poland as early as the 15th–16th century, for example in the 15th century wooden church in Dębno [5]. It is a form of a lap joint reinforced with a wedged tenon (tab. 2), thanks to which the joint becomes rigid and durable. Beams are joined to one another in the wall with hard wooden pegs. The Slavic lap joint is a finger joint (tab. 2). This does not provide for a solution that is aesthetically pleasing nor beneficial in other ways as in the case of Podhale quoined lap joints. Due to the absence of protrusions, Slavic lap joints are characterised by worse thermal insulation properties – leading to freezing in the corners on account of a higher heat transfer coefficient for wood running in parallel with the grain than that running perpendicular to it.

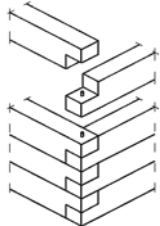
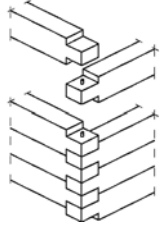
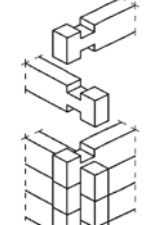
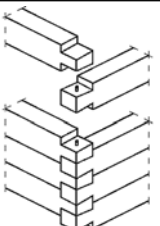
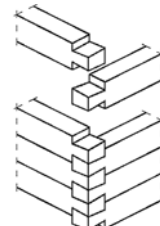
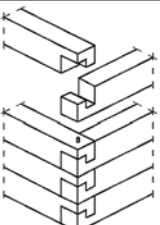
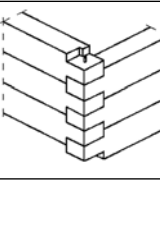
In other solutions (tab. 2), beams were joined in the corners through lap joints or scarf joints, whereas the tie-beams resting upon one another were joined with pegs. A less common solution used in the case of longer walls and vertical pillars is to join them with a mortise and tenon joint to the groundbeam and to the uppermost beam [13]. Internal walls were joined to external walls by means of dovetail or lap joints as in the corners.

The golden age of wooden frame construction, known for over a thousand years, took place in the 15th and 16th centuries [5]. In Poland, aside from the Pomeranian, Warmia, Mazurian and Silesian regions, the system was not as common as in Germany, France and England [14], [15].

The structure of joints in this type of arrangement is presented as follows (fig. 5):

Tab. 2. Złącza ścian wieńcowych w narożach

Tab. 2. Corner connections in crowned constructions

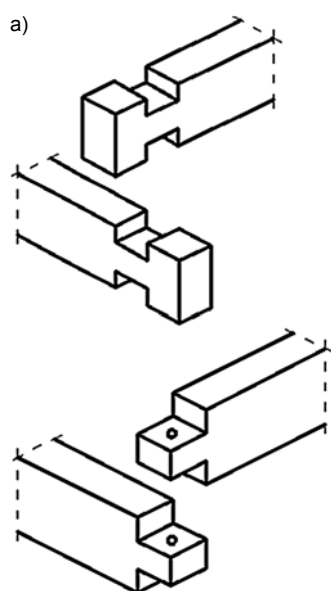
Rodzaj połączenia <i>Type of joint</i>	Rysunek połączenia <i>Joints illustrated</i>	Opis połączenia <i>Description of joint</i>	Uwagi dodatkowe <i>Additional comments</i>
Nakładka prosta z kołkowaniem <i>Half lap joint with pegs</i>		Końce belek pozacinane pół na pół tworzą wieńce wyrównane z góry i dołu <i>The beam ends are cut out half-way and form a crown smoothed from top to bottom</i>	Konieczne kołkowanie <i>Pegs are essential</i>
Na obłap bez ostatek (nakładka obustronna z kołkowaniem) <i>Saddle notch corner joint without protrusions (double half lap joint with pegs)</i>		Wieńce nie są wyrównane; belki mijają się na przemian po wysokości <i>The crown is not smoothed out; beams alternate with one another with height</i>	Tzw. węgiel gładki; konieczne kołkowanie <i>Smooth quoin; pegs are essential</i>
Na obłap z ostatekami (nakładka obustronna z ostatekami) <i>Saddle notch corner joint with protrusions (double half lap joint with protrusions)</i>		Jak powyższe, z wypuszczonymi poza lico ściany ostatekami <i>As above, except with protrusions extending from the wall face</i>	Połączenie nieprzesuwalne, o ile zostaną wypuszczone ostateki <i>The joint is not to be moved if the protrusions are extended outward.</i>
Nakładka pletwowa (nakładka obustronna poszerzana) <i>Finger lap joint (double lap joint widened on both sides)</i>		Nakładka poszerzona obustronnie – w jednej belce z boku od strony wewnętrznej, w drugiej u końca <i>Lap joint widened on both sides – on the internal side of one beam, and at the end of the other</i>	Tzw. cynkowanie; połączenie zabezpieczone przed rozsunięciem w jedną stronę <i>So called galvanization; joint secured against being drawn apart in one direction</i>
Zamek pletwowy (zamek słowiański, zamek tyrolski) <i>Lap joint (Slavic lap joint, Tyrolean lap joint) lap joint with key locking</i>		Wycięcia w belkach poszerzone zarówno u końców, jak i od strony wewnętrznej u boków <i>The notch in beams is extended both at the ends and on the internal sides</i>	Pożądane kołkowanie dla wzmocnienia połączenia <i>Pegs are desirable to strengthen the joints</i>
Zamek francuski <i>French lap joint lap joint with key locking</i>		Wieńce wyrównane obustronnie z wycięciami tworzącymi zamek; jedna z belek trzyma się zakończeniem hakowym, druga rozszerzeniem w jaskółczy ogon <i>Crown is smoothed on both sides of the notches making up the fastener; one beam has a hook end, whereas the other has a dovetail end</i>	Połączenie stosowane do łączenia w narożach podwalin ścian zewnętrznych i działowych <i>This joint is used to connect ground beams to the corners with external and internal walls</i>
Zamek podhalański (zamek góralski) <i>Podhale lap joint (Highlander scarf joint) lap joint with key locking</i>		Nakładka wzmocniona klinowatymi wypustami (tzw. palcami) w jednej belce zaciskanyymi w odpowiadających im wyciętych w drugiej belce wpustach <i>Lap joint reinforced with wedge-shaped tenon (so called fingers) in one beam pressed into a corresponding notch cut out in the second beam</i>	
Wrąb zwyczajny <i>Simple notch</i>		Belki zacięte na kilka cm; pozostają między nimi szpary <i>Beam is notched to couple of cm; spaces remain in between the beams.</i>	

- słupy pośrednie połączone były z podwaliną na czopy proste, zaś słupy narożne na czopy boczne (odsadzone);
- zastrzały wpuszczane w podwalinę i oczep na czopy skośne z zaciosem lub bez (nie łączono ich ze słupami);
- rygle łączone ze słupami na czopy proste (połączenie kołkowane), a w nadprożach i parapetach z zaciosem. Rygle z zastrzałami łączone były na czopy skośne (połączenie kołkowane);
- w oczep wpuszczano czopy słupów i zastrzałów. Oczepty łączono w narożnikach jak podwaliny;
- na oczeple położone były belki stropowe połączone na wręby (na jaskółczy ogon, narożny) [13].

Najstarsze znane konstrukcje w typie sumiko-wołatkowym pochodzą z VIII–IX w. Stosowane były wówczas w ścianach budynków mieszkalnych i gospodarczych, m.in. w Biskupinie [5]. Ten typ konstrukcji rozpowszechnił się później na znaczny obszar i przetrwał do dziś, głównie w budownictwie wiejskim Polski północnej i zachodniej. Sumiki (belki poziome) wpuszczane były w żłobki w łątkach (słupkach) na wpust.

2.2. Połączenia stropowe

Belki stropowe w konstrukcjach historycznych generalnie łączone były za pomocą połączeń czopowych. W budynkach o ścianach wieńcowych opierano je na elementach ściany i łączono z nimi zwykle na zamki pletkowe, które zapewniały dobre zakotwienie. W ścianach szkieletowych belki umieszczano na oczeple, stosując połączenia wrębowe (ryc. 5).



Ryc. 4a. Sposoby łączenia ścian wieńcowych w narożach: na zakładkę prostą z ostatekami i bez



Ryc. 4b. Połączenie węglowe z ostatekami na jaskółczy ogon chałupy z Rębowa

Fig. 4a. Methods of joining walls in crowned construction with a half lap joint with and without protrusions at the corners

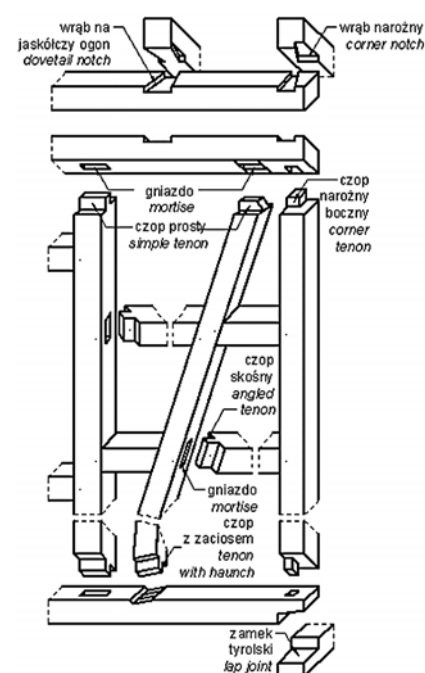
Fig. 4b. Corner joint with dovetail protrusions in the cottage in Rębowa Village

- ground beams are laid on a supporting masonry wall along the whole length of the building joined in corners by a finger lap joint (known also as the Tyrolean lap joint) with a half lap joint with pegs or a French lap joint;
- intermediate posts were joined with the ground beam by means of a simple tenon, whereas the corner pillars were joined with side tenons (teased);
- braces were introduced into the ground beam and capping beam for angled tenons with or without a dovetail (they were not joined with posts);
- bolts were connected to posts with simple tenons (pegged connection), and lintels and parapets with dovetail tenons. Bolts with braces were connected to angled tenons (pegged connection);
- posts and brace tenons were introduced to the capping beam. The capping beams were joined in the corners in the same way as ground beams;
- ceiling beams connected with notched joints (dovetail, corner) were placed on the capping beam [13].

The oldest known bonded constructions date back to the 8th–9th centuries. At that time they were used in residential and outbuildings, *inter alia* in Biskupin [5]. This construction type became widespread and still survives today, mainly in buildings in the rural areas of north and west Poland. Short beams were inserted into grooves in vertical posts using a matching tongue.

2.2. Ceiling joints

Ceiling beams in historical buildings were most commonly joined together by means of mortise and tenon joints. In buildings with crowned construction



Ryc. 5. Szczegóły łączenia ścian ryglowych

Fig. 5. Details of joining timber frame walls

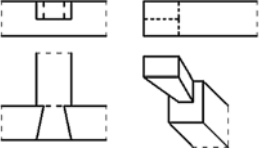
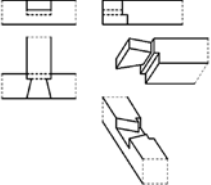
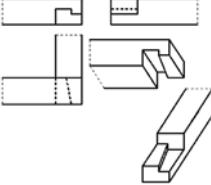
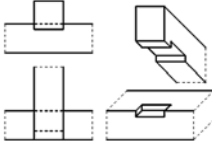
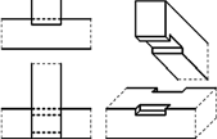
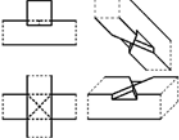
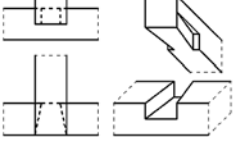
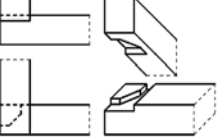
Tab. 3. Złącza w ścianach szkieletowych.

Tab. 3. Connections of wall-frame elements

Rodzaj połączenia <i>Type of joint</i>	Rysunek połączenia <i>Schematic</i>	Zastosowanie, uwagi <i>Applications, notes</i>
Połączenia elementów na długości – podwaliny, oczepy <i>Joining elements lengthwise – ground beams, capping beams</i>		
Nakładka prosta <i>Half lap splice joint</i>		Dla podwalin na podmurówce; konieczne kołkowanie; nie przenosi rozciągania <i>For ground beams on the supporting masonry wall; pegging is essential; does not transfer tension</i>
Nakładka skośna <i>Beveled lap splice joint</i>		Zastosowanie jak nakładka prosta, dla płatwi; konieczne kołkowanie; nieco wytrzymalsza na siły poprzeczne <i>Applied as with the half lap splice joint to purlin plates; pegging is essential; somewhat more resistant to lateral forces</i>
Nakładka zazębiona <i>Tabled lap splice joint</i>		Dla podwalin na pełnym podkładzie lub w innych przypadkach przy wzmocnieniu śrubami lub strzemionami; może przenosić siły rozciągające <i>For ground beams placed on a supporting masonry wall or in other cases with strengthening with internal bolts or stirrups; may transfer tensile stresses</i>
Nakładka na znak pioruna <i>Hooked scarf joint with nibs</i>		Zastosowanie jak nakładka zazębiona; odporniejsza na siły poprzeczne; przy dodatkowym okuciu może przenosić zginanie <i>Applied as with the tabled lap splice joint; more resistant to lateral forces; with additional fittings can transfer flexural loads</i>
Zamek skośny klinowany <i>Wedged tabled splice joint</i>		Np. między słupami ściany ryglowej; wymagane kołkowanie tylko przeciw przesunięciom bocznym; dobrze pracuje na zginanie przy niewielkich rozpiętościach <i>e.g. between posts in a timber-frame wall; pegging is needed only to counteract sideways shifts; good flexural performance for short spans</i>
Zamek na znak pioruna <i>key locked hooked scarf joint with nibs</i>		Zastosowanie i zachowanie jak zamek skośny; odporniejszy na siły poprzeczne; przy odpowiednim okuciu może pracować na zginanie na większych rozpiętościach <i>Application and behaviour as with the tabled splice joint; more resistant to lateral forces; with appropriate fittings, it can carry flexural loads also for larger spans</i>
Połączenia elementów pod kątem – podwaliny, oczepy <i>Angled connecting elements – ground beams, capping beams</i>		
Nakładka prosta <i>simple lap joint</i>		Dla naroży i styków pod kątem, dla podwalin na podmurówce; konieczne kołkowanie; nie przenosi rozciągania <i>For angled corners, for ground beams on a supporting masonry wall; pegging is essential; does not transfer tension</i>
Nakładka zazębiona <i>tabled lap joint</i>		Zastosowanie jak nakładka prosta; nieco wytrzymalsza na siły poprzeczne, jednak przy większych siłach hak może ulec ścięciu <i>Applied as in with the simple lap joint; somewhat more resistant to lateral forces, but with larger forces the hook may be severed</i>

Tab. 3. cd.

Tab. 3. cont.

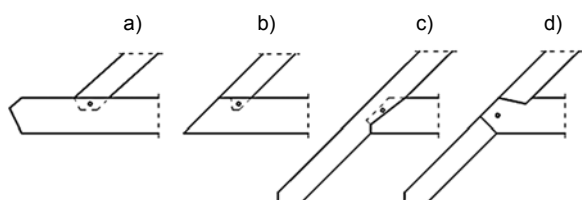
Rodzaj połączenia <i>Type of joint</i>	Rysunek połączenia <i>Schematic</i>	Zastosowanie, uwagi <i>Applications, notes</i>
Nakładka w jaskółczy ogon <i>Dovetailed lap joint</i>		Pracuje lepiej na rozciąganie; osłabia nadmiernie belkę przy dużym wycięciu, przy zbyt małym (mniej niż pół belki) nieodporna na siły ścinające <i>Works best to prevent tension; weakens inordinately the beam where the notch is larger; where the notch is smaller (less than half the beam length) it is not resistant to shearing forces</i>
Nakładka w jaskółczy ogon z posłkiem <i>Dovetailed lap joint with shoulder</i>		Jaskółczy ogon – 1/3 belki, a tylko posłtek przy styku dochodzi do połowy; belka nie jest nadmiernie osłabiona, a połączenie staje się odporne na ścinanie; zastosowanie: w wymianach narożnych <i>Dovetail – 1/3 of the beam, and only the shoulder at the point of contact extends to half way; the beam is not weakened especially and the connection is resistant to shear stresses; used in corner exchanges</i>
Zamek francuski <i>key locked lap joint</i>		Do belek o dużych wymiarach i dobrym materiale; lepsze zamki pletwowe <i>For beams of large dimensions and good materials; finger lap joints are better</i>
Połączenia elementów na wręby – podwaliny, oczepy <i>Connecting elements with notches – ground beams, capping beams</i>		
Wrąb prosty <i>simple notched joint</i>		Zbliżony do nakładki zazębionej, mniejszy wzajemny wpust – 2–3 cm <i>Similar to the table spliced joint; smaller tongue on both sides – 2–3 cm</i>
Wrąb podwójny <i>double notched joint</i>		Lepszy od prostego, gdyż nie osłabia belki na podporze <i>Better than the simple notched joint as the beam is not weakened with respect to its load-bearing support</i>
Wrąb krzyżowy <i>Cross notched joint</i>		Równie dobry jak podwójny, mniej osłabiony przekrój oczepu <i>As good as the double notched joint; weakness of the cross-section of the capping beam is lessened.</i>
Wrąb w jaskółczy ogon <i>Dovetailed notched joint</i>		Znaczne osłabienie przekroju oczepu <i>Considerable weakening of the capping beam cross-section</i>
Wrąb narożny <i>corner notched joint</i>		W tzw. ścięty ząb lub przesunięty jaskółczy ogon <i>With so-called cut tooth or shifted dovetail</i>

2.3. Połączenia w więźbie dachowej

W przypadku najprostszej więźby krokwiowej sposób łączenia krokwi z belką wiązarową zależał od usytuowania ich zakończeń [16]. W przypadku, gdy belka wystawała poza krokiew, stosowano wrąb zębaty z czopami lub bez czopów (ryc. 6a). Gdy belka i krokiew kończyły się w tym samym miejscu, stosowano wrąb zębaty cofnięty (odsadzony) lub czop odsadzony (ryc. 6b). Dla krokwi zwisającej poza belkę, tworzącej okap, stosowano zaś czop z zaciosem lub bez, albo czop na nakładkę (ryc. 6c, d).

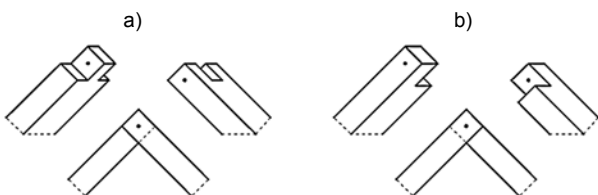
W kalenicy krokwie łączono na zwidłowanie, które umożliwiało przenoszenie sił osiowych i uniemożliwiało przesunięcie krokwi lub, w przypadku zbyt małej szerokości krokwi, która nie pozwalała na wykonane zwidłowania, na nakładkę (ryc. 7).

W więźbach jętkowych jętka była łączona z krokwią na nakładkę zwykłą, w jaskółczy ogon lub na czopy z kołkowaniem (ryc. 8). W przypadku stosowania murłat (namurnic – wg [4]) układano na nich belki wiązarowe na wrąb. Krokwie dołączano niejednokrotnie za pomocą krótkich belek krokwiowych prostopadle na nakładkę w jaskółczy ogon.



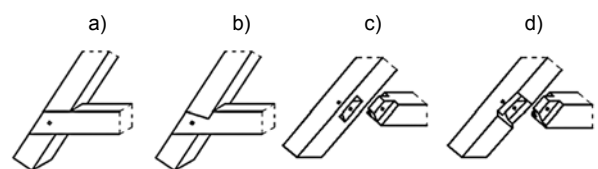
Ryc. 6. Połączenie krokwi z belką wiązarową: a) na czop zwykły, b) na czop cofnięty, c) na czop z zaciosem, d) na nakładkę

Fig. 6. Joints connecting roof rafter and tie-beam: a) simple mortise and tenon, b) receding tenon, c) dovetail tenon, d) lap joint



Ryc. 7. Połączenia krokwi w kalenicy: a) na zwidłowanie, b) na nakładkę

Fig. 7. Types of joints between roof rafters at the roof ridge: a) bridle joint b) lap joint



Ryc. 8. Połączenia jętki z krokwią: a) na nakładkę prostą, b) na jaskółczy ogon, c) na czop zwykły, d) na czop z wrębem

Fig. 8. Types of joint connecting collar beam with roof rafter: a) simple lap joint, b) dovetailed lap joint, c) mortise and tenon, d) mortise and tenon with haunch

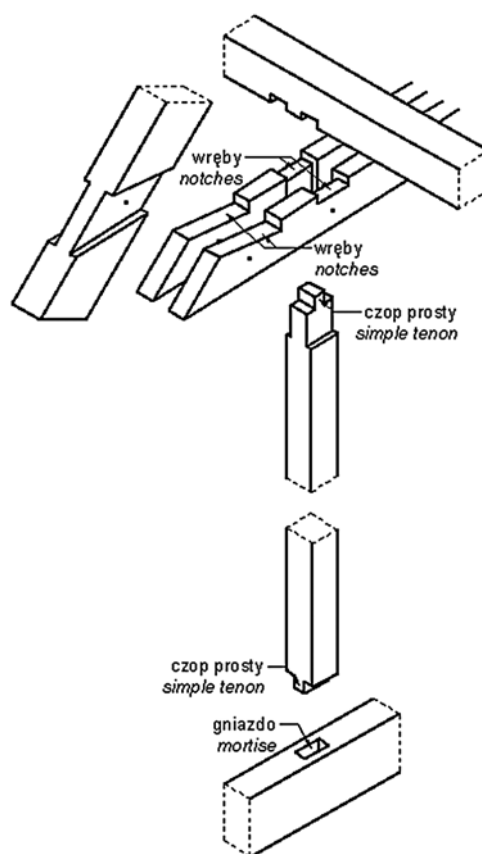
W więźbach płatwiowo-kleszczowych słupy wpuszczane były czopami w gniazda wykonane w belkach wiązarowych lub podwalinowych i płatwiach. Kleszcze wcinano na wrąb w słupy i krokwie (złącza były czasem

walls they rested on wall elements and were joined most commonly with finger lap joints, which assured good anchoring. In framed wall constructions, beams were placed on capping beams and connected by means of notched joints (fig. 5).

2.3. Joints in roof structures

In the simplest form of rafter framing, the method of joining the roof rafters to the tie-beam depended on positioning their endings [16]. Where the tie-beam extended beyond the rafter, use was made of grooved notches with or without tenons (fig. 6a). Where the tie-beam and the rafter end were in the same place, an embedded and receding notch or tenon was applied (fig. 6b). For rafters which extended beyond the tie-beam creating an overhang, dovetail tenons or lap joints were used (fig. 6c, d).

At the roof ridge, rafters were connected using bridle joints, which enabled a transfer of axial forces and prevented shifting of the rafters, or using lap joints in cases where the rafters were unduly narrow and bridle joints could not be used (fig. 7).



Ryc. 9. Połączenie w więźbie płatwiowo-kleszczowej

Fig. 9. Joints in a purlin-tie roof

In collar beam roofs, collar beams were joined to rafters by means of a simple lap joint with a dovetail or mortise and tenon joints with pegging (fig. 8). Where wall plates were used (according to [4]), tie-beams

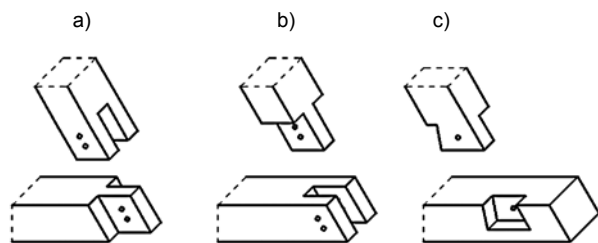
wzmocnione za pomocą śrub). Płatwie nad kleszczami unieruchomione były dzięki wrębom. Krokwie opierane były na płatwiach za pomocą połączeń na wręb [16]. System połączeń w więźbie płatwiowo-kleszczowej przedstawiono na ryc. 9.

W więźbach dachowych kościołów romańskich i gotyckich przykłady pokazują połączenia krokwi z belką na zwidłowanie (połączenia kołkowane), przy czym zwidłowanie może występować zarówno w krokwi (kościół w Niedermending), jak i w belce (katedra w Konstancji, kościół w Rudzie Drogolewskiej z XIV w. [6]) – ryc. 10 (a i b). Inny przykład połączenia krokwi z belką to połączenie na jaskółczy ogon – ryc. 10c (kościół w Szydłowie z XIV w.).

Z czasem zaczęto wykonywać połączenia na czop zwykły lub cofnięty.

Połączenie krokwi w kalenicy wykonywano najczęściej na nakładkę prostą lub zwidłowanie z użyciem kołków początkowo na nakładkę prostą lub jaskółczy ogon, a później na czop i gniazdo zwykłe albo na czop i gniazdo z wrębem. Sposoby łączenia storczyków i wieśzaków przedstawiono w tab. 4.

W [17], [18] opisane jest także połączenie na zamek ukośny, inaczej znak pioruna (ryc. 11), które było powszechnie stosowane w architekturze sakralnej włoskiego renesansu, a które wg badań archeologicznych znane było już w starożytnym Rzymie. Przykład takiego połączenia pochodzi z XVII-wiecznego kościoła św. Antoniego w Ostrawie [17].



Ryc. 10. Połączenia krokwi z belką: a) na zwidłowanie w krokwi, b) na zwidłowanie w belce, c) na jaskółczy ogon

Fig. 10. Types of joints connecting rafter and tie-beam: a) bridle joint on rafter, b) bridle joint on tie-beam; c) dovetail joint

3. ANALIZA PRACY STATYCZNEJ WYBRANYCH POŁĄCZEŃ

Z istotności połączeń ciesielskich w analizie całej konstrukcji zdawano sobie sprawę już w minionych epokach, o czym świadczą zachowane dokumenty, np. [19], [20]. Stan techniczny połączeń wpływa na zdolność konstrukcji do przenoszenia obciążeń, jej zachowanie i deformacje. Uszkodzenie połączeń może być niebezpieczne dla całej konstrukcji ze względu na znaczne osłabienie przekrojów elementów w złączach. Połączenia ciesielskie mogą przenosić obciążenia dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu i dopasowaniu powierzchni. Występujące na powierzchniach styku elementów siły tarcia pomagają w przenoszeniu obciążeń oraz zapewniają spójność złącza. Można stwierdzić, że większość historycznych połączeń

were placed on them on notches. Rafters were joined together in many cases by means of short rafter beams placed perpendicularly using a dovetail lap joint.

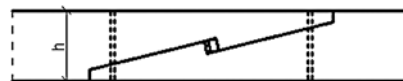
In purlin-tie roofs, posts with tenons were inserted into mortises made in tie-beams or purlin beams. Roof ties were notched into the posts and rafters (sometimes, the joints were reinforced using screws). The purlin beams above the roof ties were immobilized by means of notches. The rafters rested on the purlin beams and connected with the notched joints [16]. The joining system in the purlin roof is presented in fig. 9.

The roof rafters of Romanesque and Gothic churches provide examples of different types of joints connecting roof rafters to beams using bridle joints (pegged joints), where pegs can be found both in rafters (Church in Niedermending) and also in the beam (the cathedral in Constance, church in Ruda Drogolewska from the 14th century in [6]) – fig. 10 (a and b). Another example of connecting the roof rafter and beams involved making use of the dovetail joint – fig. 10c (church in Szydłów from the 14th century).

Over time, simple or receding mortise and tenon joints became common.

Joining rafters at the roof ridge was most commonly realised with a simple lap joint or bridle joint with pegs applied as a simple lap joint or dovetail, and later on as a simple mortise and tenon or a mortise and tenon with haunch. The different ways of joining king and queen posts are presented in tab. 4.

The scarf joint known also as the hooked scarf with nibs is described in [17] and [18] (fig. 11) was widely used in Italian Renaissance sacral architecture and was also known in ancient Rome according to archaeological research. An example of this type of joint can be found in the 17th century Church of St. Anthony in Ostrava [17].



Ryc. 11. Połączenie na znak pioruna (zamek ukośny)

Fig. 11. Scarf joint: key locked hooked scarf with nibs

3. ANALYSIS OF STATIC BEHAVIOUR OF SELECTED JOINTS

The significance of wood joinery for analysing a construction as a whole was recognised in past centuries, as evidenced by surviving documents, e.g. [19], [20]. The technical status of joints influences the capability of the whole building structure to carry loads, as well as building behaviour and deformation. Damage to specific joints could be dangerous for the building structure as a whole as the cross-sections of building elements are weakened at points of connection.. Carpentry joints can carry loads due to appropriate shaping and matching of surfaces. Friction forces arising on surfaces where elements join help to carry loads and ensure joint integrity. It is possible to state that most

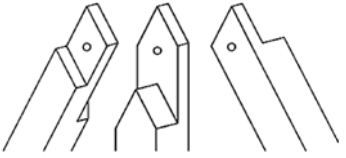
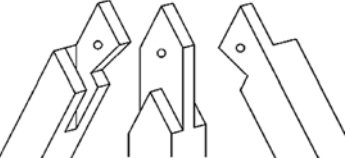
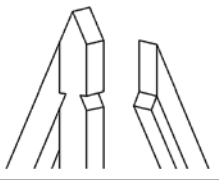
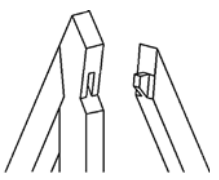
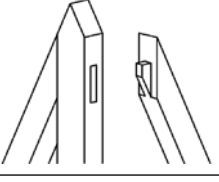
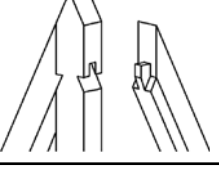
cielskich przenosi naprężenia ściskające i ścinające; niektóre – niewielkie naprężenia rozciągające (połączenia na jaskółczy ogon). Stateczność konstrukcji jest uzależniona od sztywności złącza [21]. W przypadku złączy przegubowych, w odróżnieniu do sztywnych, konieczne było stosowanie stężeń. Przed wprowadzeniem elementów wzmacniających z żelaza i stali uzyskanie sztywnych węzłów było praktycznie niemożliwe.

W Eurokodzie 5 [9] wymagane jest uwzględnienie podatności i mimośrodków w złączach, jednak nie zawarto w nim informacji dotyczących ich ustalania.

historic carpentry joints are able to carry compressive and shear stresses; and some (dovetail joints) relatively small tensile stresses. The static behaviour of the building structure is dependent on the rigidity of the joint [21]. In contrast to rigid joints, hinged joints required the application of braces. Achieving completely rigid joints was practically impossible prior to the introduction of strengthening elements made of metal or steel.

According to Eurocode 5 [9], joinery must take into account flexibility and eccentricity, yet there is no information provided as to how these are to be determined.

Tab. 4. Złącza elementów więźb dachowych
Tab. 4. Joining elements in roof constructions

Rodzaj połączenia <i>Type of joint</i>	Rysunek połączenia <i>Schematic</i>	Zastosowanie, uwagi <i>Application, notes</i>
Połączenie storczyka z krokiewi w więźbie storczykowej <i>Joints for connecting the king post to rafters in a king post truss</i>		
Nakładka prosta <i>halved lap joint</i>		Połączenie zapewnia współpracę krokwi i pionowego stężenia dachu; nie musi przenosić obciążeń pionowych; konieczne kołkowanie; Przykład: dach kościoła w Szydłowie [13] <i>The joint ensures cooperation between rafters and the vertical bracing of the roof; it does not necessarily entail transfer of vertical loading; pegging is essential; Example: church roof in Szydłów [13]</i>
Zwidlowanie <i>bridled joint</i>		Połączenie zapewnia współpracę krokwi i pionowego stężenia dachu; nie musi przenosić obciążeń pionowych; konieczne kołkowanie; precyzyjniejsze ustawienie elementów względem siebie niż w przypadku nakładki <i>The joint ensures cooperation between rafters and the vertical bracing of the roof; it does not necessarily entail transfer of vertical loading; pegging is essential; more precise positioning of elements with respect to one another than in the case of the halved lap joint</i>
Na wręby <i>notched joint</i>		Połączenie zapewnia współpracę krokwi i pionowego stężenia dachu; nie musi przenosić obciążeń pionowych; Przykład: dach kościoła w Domachowie [6] <i>The joint ensures cooperation between rafters and the vertical bracing of the roof; it does not necessarily entail transfer of vertical loading; Example: church roof in Domachow [6]</i>
Inne: na styk z kołkiem oraz na styk z kołkiem ze ściętym obustronnie storczykiem <i>Other: adjacent to the peg or adjacent to the peg with the king post bevelled on both sides</i>		
Połączenie wieszaka z krokiewi <i>Joints for connecting queen posts to rafters</i>		
Czopy cofnięte <i>Receding mortise and tenon joint</i>		Połączenie ma przenosić siły między wieszakiem a krokiewi <i>The joint allows transfer of forces between the queen post and rafters</i>
Czopy cofnięte z ukosowaniem wieszaka <i>Receding mortise and tenon joint with bevelling of the king post</i>		Połączenie ma przenosić siły między wieszakiem a krokiewi; ukosowanie wieszaka zwiększa znacznie nośność połączenia <i>The joint allows transfer of forces between the queen post and rafters; the bevelling of the post significantly increases the load-bearing capacity of the joint</i>
Czopy cofnięte z wrębami w wieszaku <i>Receding mortise and tenon joint with notches in the king post</i>		Połączenie ma przenosić siły między wieszakiem a krokiewi; wykonanie wrębów w wieszaku znacznie zwiększa nośność połączenia <i>The joint allows transfer of forces between the queen post and rafters; notches in the post significantly increase the load-bearing capacity of the joint</i>

W analizie uwzględnić należy podatność złączy, których modelowanie wiąże się z trudnością, wynikającą z różnic w geometrii i różnych cech mechanicznych dla każdego złącza ([22], [23], [24], [25]). W [8] przedstawiono wartości sztywności oszacowane dla powszechnie występujących połączeń o typowych wymiarach (tab. 5).

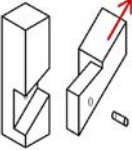

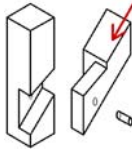
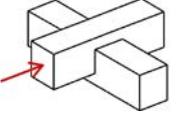
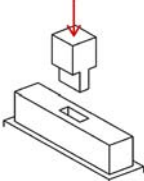
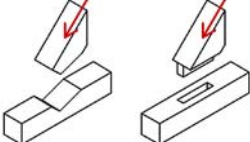
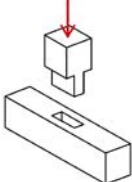
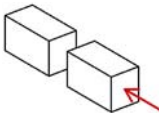
Powinno się uwzględniać mimośrodowość złączy, gdy wartości oczekiwanych sił normalnych lub mimośródów są duże, tak, że uzyskuje się znaczne wartości momentów zginających. Na przykładzie połączenia na wrąb czołowy (ryc.12a) widać, że miejsce przekazania

Analysis must take into account the flexibility of joints, which presents modelling with difficulties due to different geometry and different mechanical properties of each joint ([22], [23], [24], [25]). The estimated stiffness values for the most common joints of the most typical dimensions are presented in [8] (tab. 5).

The eccentricity of the joint should be considered when the expected values of normal or eccentric forces are so large that they generate significant bending moment values. The example of a frontal angled notched joint (fig. 12a) shows that the point of force transfer is

Tab. 5. Przykładowe wartości sztywności dla poszczególnych połączeń [8]

Tab. 5. Example stiffness values for different types of joints [8]

Rodzaj połączenia <i>Type of joint</i>	Rodzaj obciążenia <i>Type of load</i>	Szkic <i>Sketch</i>	Wartość sztywności <i>Stiffness value</i>
Połączenie na jaskółczy ogon <i>Dovetail joint</i>	rozciąganie <i>tension</i>		1–3 kN/mm
Kolek drewniany <i>Wooden peg</i>	ściananie <i>shearing</i>		2–7 kN/mm
Połączenie na jaskółczy ogon <i>dovetail halved joint</i>	ściskanie <i>compression</i>		5–30 kN/mm
Wrąb jednostronny <i>notched and halved joint</i>	ściskanie <i>compression</i>		10–20 kN/mm
Czop zwyczajny pełny ~ belka podparta w sposób ciągly <i>Inclined tenon</i> ~ continuously supported beam	ściskanie <i>compression</i>		80–150 kN/mm
Wrąb pełny, wrąb z czopem <i>single abutting joint/ single step joint</i>	ściskanie <i>compression</i>		80–150 kN/mm
Czop zwyczajny pełny ~ belka niepodparta w sposób ciągly <i>Inclined tenon</i> ~ Beam that is not continuously supported	ściskanie <i>compression</i>		150 kN/mm
Styk poziomy prosty <i>butt joint</i>	ściskanie <i>compression</i>		→ ∞



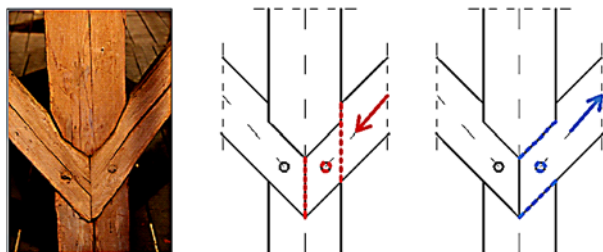
Ryc. 12. Schematy węzłów i ich mimośrody

Fig. 12. Schematics of joints and their eccentricities

siły nie jest równoznaczne z miejscem przecinania się osi prętów – powstaje więc mimośród. O ile w tym przypadku jest prosty do wyznaczenia, to w przypadku bardziej złożonych połączeń (jak np. w węźle pokazanym na ryc. 12b), jest to zagadnienie bardziej skomplikowane.

Na zachowanie statyczne połączeń ciesielskich, oprócz wymienionych zagadnień, wpływ ma wiele innych czynników, często trudnych do określenia. Są to między innymi: spękania, sęki, nierównomierny przebieg włókien i inne niedoskonałości występujące w drewnie; wcześniejsze obciążenia i związane z nimi odkształcenia materiału oraz obciążenia długotrwałe; wilgotność wpływająca na zachodzące zjawiska zmiany objętości – skurcz i pęcznienie.

W zależności od sposobu obciążenia złącze może różnie pracować i siły/naprężenia przenoszone są przez różne jego części (ryc. 13), co skutkuje różnicą w podatności.



Ryc. 13. Schemat połączenia na jaskółczy ogon z zaznaczonymi elementami przenoszącymi obciążenia pod wpływem siły ściskającej (kolor czerwony) – docisk i rozciągającej (kolor niebieski) – tarcie
Fig. 13. Schematic of a dovetail joint with identification of elements carrying compressive loads (red colour) – contact pressure and tensile loads (blue colour) – friction

Kołki nie tylko wspomagają przenoszenie sił rozciągających, ale także zapewniają dokładne usytuowanie elementów względem siebie. Z analiz, m.in. w [6], [26], [27], [28] wynika, że kołki są elementami zwiększającymi w sposób znaczący nośność połączenia.

Połączenia czopowe

Połączenia na czop i gniazdo przenoszą przede wszystkim naprężenia ściskające. Nie były zbyt mocne i wymagały kołkowania. Zwykle otwór na kołek w czopie był lekko przesunięty w stosunku do otworu w gnieździe tak, że złącze zostawało zacieżnione po wprowadzeniu kołka. Siła między kołkiem a czopem powodowała przyleganie do gniazda i zapewniała złączu ścisłe przy-

not always the same as the crossing-point of rod axes – eccentricities arise as a result. In this case, determining the force transfer is straightforward, but in more complex joints (as for example in the joint shown in fig. 12b) the matter is much more complicated.

In addition to the matters discussed, the static behaviour of carpentry joints is influenced by many other factors, which are often difficult to determine. These include *inter alia*: cracks, knots, irregular direction of wood grain and other imperfections appearing in the wood; earlier loading and subsequent material strains or long-term loading; humidity influencing volume changes – contraction and swelling.

Depending on the type of loading, the joint can behave differently and the forces/stresses are carried by different parts of the joint (fig. 13), which results in differences in maleability.

Pegs not only enable the transfer of tensile forces, but also ensure that elements are positioned precisely in relation to each other. From analyses reported *inter alia* in [6], [26], [27], [28] it can be concluded that pegs are elements, which significantly increase the load-bearing capacity of the joint.

Mortise and tenon joints

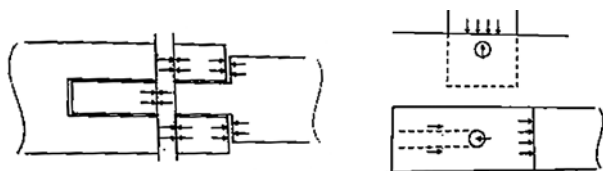
Mortise and tenon joints transfer compressive stress in the first instance.

They were not strong and so required pegging. Most commonly, the peg in the tenon was slightly displaced in relation to the opening in the mortise so that the joint could be tightened following insertion of the peg. The force between the peg and the tenon caused adherence to the mortise and assured tight adherence of the joint. The peg was bent and subjected to stresses resulting from its function to stiffen the joint (fig. 14). Too large a force in the joint could also destroy the peg. Pegs were made from harder wood, as with softer wood, the destruction would take place more quickly due to shear stresses [21], [29]. As the distance to the ends beyond the peg is limited, the joint does not carry significant tensile loads [30].

Notched joints

Notched joints transfer mainly compressive loads. Depending on the form of the notch, it is possible to

leganie. Kołek był zginany, występowały w nim naprężenia wynikające z tego, że usztywniał złącze (ryc. 14). Zbyt duże siły powstające w złączu mogły spowodować zniszczenie kołka. Kołki wykonywane były z twardego drewna; w miękkim proces zniszczenia następowałby szybciej w wyniku ścinania [21], [29]. Jako że odległość końców poza kołkiem jest ograniczona, połączenie nie przenosi znacznych obciążeń rozciągających [30].



Ryc. 14. Schemat rozkładu sił w kołkowanym połączeniu [29]

Fig. 14. Schematics showing distribution of forces in a pegged joint [29]

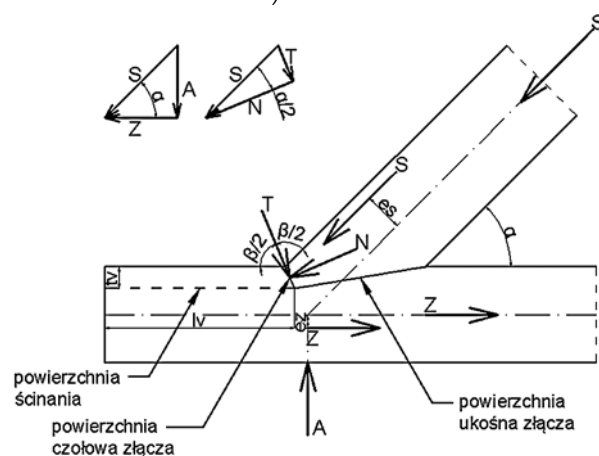
Połączenia na wręby

Połączenia na wręby przenoszą głównie obciążenia ściskające. Ze względu na formę wrębów można wyróżnić połączenia na wręby policzkowe i czołowe: pojedyncze i podwójne, wykonywane przy dużych siłach ściskających i małych kątach (do 25°) w celu korzystniejszego rozkładu sił i naprężeń [11]. Wartość przenoszonej siły jest zależna od wartości dopuszczalnych naprężeń na docisk w pochylonych powierzchniach wrębu, od odpowiadającej powierzchni elementu przejmującego obciążenie i od wielkości powierzchni wrębu [31]. W przypadku idealnym siła ściskająca byłaby rozłożona na składowe działające na dwie powierzchnie styku: czołową i ukośną. Jednak w warunkach rzeczywistych pojawiają się szczeliny, nie można zatem zakładać idealnego przylegania powierzchni. Przyjmuje się, że siła ściskająca jest przenoszona jedynie przez docisk czołowy. Siłę ściskającą S rozkłada się na normalną N i poprzeczną T (ryc. 15), w wyniku czego powiększa się mimośród siły S względem osi elementu. Siła poprzeczna T przenoszona jest przez tarcie występujące na powierzchni czołowej lub na przedniej części powierzchni ukośnej. Najkorzystniejszym położeniem powierzchni czołowej wrębu jest położenie po dwusiecznej kąta rozwartego połączenia, gdyż skutkuje ono uzyskaniem najmniejszej wartości kąta między kierunkiem działania siły a kierunkiem włókien i w rezultacie prowadzi do zwiększenia wartości dopuszczalnej docisku i zmniejszenia głębokości wcięcia, czyli najmniejszego osłabienia przekroju elementu. W poziomym elemencie występują także naprężenia ścinające, które mają rozkład nierównomierny (największa wartość tych naprężeń występuje najbliżej powierzchni czołowej wrębu i zmniejsza się wraz z oddalaniem się).

Połączenia stykowe

Połączenia stykowe, stosowane do przedłużania elementów, wykonywano w najmniej wyężonym przekroju, gdyż łączone elementy w styku nigdy nie

distinguish joints with side and leading surface notches: single and double notches, which are realised when there are large compressive forces and small angles (up to 25°) with the objective of bringing about a more favourable distribution of forces and stresses [11]. The value of the force transferred is dependent on the value of stress allowed for the contact pressure on the inclined surface of the notch, as well as on the surface area of the element to which the loading is transferred and on the size of the notch surface [31]. In the ideal situation, the compressive force would be distributed on the joint elements impacting the two adjoining surface areas: the leading and inclined ones. But in field conditions, fissures appear, which means that it is impossible to assume an ideal contiguity between the surfaces. Thus it is assumed that compression force is transferred only through the leading surface contact pressure. The compressive force S is divided into a normal force N and a transverse force T (fig. 15), which results in an increase of eccentricity of the force S in relation to the axis of the element. The transverse force T is transferred through friction on the leading surface or the front part of the inclined surface. The most favourable position for the notch leading surface is the position following the open angle bisector of the joint, as this results in attaining the smallest value of the angle between the direction of force and the direction of wood grains of the wood fibres and which leads to increasing the allowable value of contact pressure and reducing the depth of the notch – in other words, the smallest weakening of the element cross-section. In an horizontal element, shear stresses also appear, which have an irregular distribution (the highest value of such stresses appears nearest the leading surface and decreases with distance).



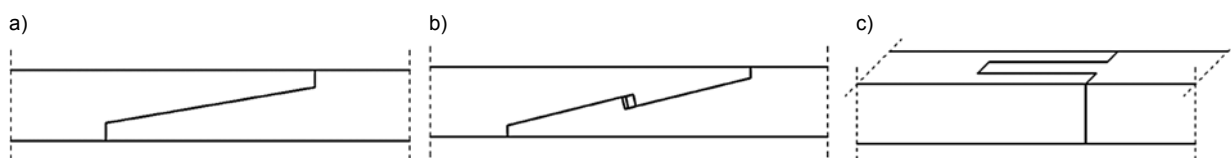
Ryc. 15. Schemat przenoszenia sił w połączeniu na wręb czołowy pojedynczy

Fig. 15. Schematic showing load transfer in an angled simple notched joint

Scarf joints

Scarf joints are used to elongate building elements and were applied in the least strained cross-section as elements where they are joined will never have the

mogły mieć takiej nośności jak przekrój niełączony [30]. W historycznych konstrukcjach połączenia te, poza przedłużaniem podwalin i oczepów w budynkach szkieletowych, wykonywane były do przedłużania elementów więźb dachowych, takich jak płatwie czy belki wiązarowe. Prosta nakładka skośna (ryc. 16a) mogła być stosowana w przypadku złączy obciążonych prostopadle i zlokalizowanych przy podporze. Wówczas złącze odpowiadało za przeniesienie sił ścinających. W przypadku łączenia elementów rozciąganych, takich jak belki wiązarowe, konieczne było zastosowanie innego połączenia. Dla elementów rozciąganych wykonywano zamki na znak pioruna (ryc. 16b). Połączenia były klinowane, co miało pomagać w przenoszeniu obciążeń oraz zapewniać ścisłość złączy. Gdy siła, która miała zostać przeniesiona przez złącze, działała w innej płaszczyźnie, np. dla murłat obciążonych siłą poziomą przekazywaną z krokwi, stosowano złącza na zwidłowanie (ryc. 16c). Złącza te często ulegały zniszczeniu, głównie z uwagi na znaczne osłabienie przekroju [29].



Ryc. 16. Połączenie stykowe: a) na nakładkę skośną, b) na znak pioruna, c) na zwidłowanie
 Fig. 16. Scarf joints: a) nibbed scarf, b) key locked hooked scarf with nibs, c) bridle scarf

Przykłady typowych połączeń w historycznych więźbach dachowych

Połączenie krokwi z belką tramową ma przenosić rozpór (siłę poziomą) oraz siłę pionową z krokwi. W przypadku powszechnie stosowanych połączeń na zwidłowanie (ryc. 10) siła pionowa przenoszona jest przez docisk, a pozioma siła rozporu przez tarcie pomiędzy belką i krokwią oraz kołki. Wielkość siły tarcia zależy od kąta nachylenia krokwi i dla większego kąta nachylenia jest większa. Wartość współczynnika tarcia spada z 0,6 dla elementów suchych do 0,35 dla elementów zawilgoconych [26], [27], a co za tym idzie zmienia się wartość kąta nachylenia dachu, przy którym tarcie równoważy rozpór poziomy. Analizy w [6] wykazały, że dla przykładowej więźby krokwiowej w stanie suchym kąt nachylenia, przy którym rozpór jest równoważony przez siłę tarcia, wynosi ok. 40°, a w przypadku zawilgoconia minimum 55°. Liczne konstrukcje nie spełniały tego warunku i gdy dochodziło do uszkodzenia pokrycia dachu i zawilgoconia drewna, wiele połączeń ulegało zniszczeniu. W rzadszym połączeniu krokwi z belką na jaskółczy ogon (ryc. 10 c) siła pionowa przenoszona jest przez docisk krokwi do belki, siła pozioma przez ścinanie nakładki (czopa krokwi) i jej docisk do czołowej ściany wycięcia w belce. Dla późniejszych połączeń czopowych przenoszenie sił realizowane jest podobnie. Połączenie jętki z krokwią na jaskółczy ogon było stosowane najczęściej, gdyż mogło przenosić siłę rozciągającą. Wszystkie rozwiązania przenoszą docisk do krokwi i ścinanie.

Examples of typical joinery in historic roof structures

Joining rafters to the cross-beam is aimed at transferring thrust (horizontal force) and vertical force from the rafter. In the case of commonly used bridle scarf joints (fig. 10), the vertical force is transferred through contact pressure, whereas the horizontal thrusting force is transferred through friction between the beam and the rafter and pegs. The friction force value depends on the angle of the inclination of the rafter and is larger for larger angles. The value of the friction coefficient falls from 0.6 for dry elements to 0.35 for damp elements [26], [27], which in turn changes the angle of inclination of the roof to where the friction is counterbalanced by horizontal thrust force. Analyses [6] have shown that in an example dry roof rafter structure, the angle of inclination at which the friction force is counterbalanced is approx. 40°, whereas for damp ones the minimum is 55°. Many building structures did not meet this condition and when the roof cover sustained damage and damp affected the wood, many joints were destroyed. In the case of application of the rarer dovetail joint in connecting the rafter and beam (fig. 10c), the vertical force is transferred through contact pressure of the rafter on the beam, whereas the horizontal force is transferred through shearing of the lap joint (the rafter tenon) and its contact pressure on the leading surface of the mortise in the beam. In the case of subsequent mortise and tenon joints forces are transferred in a similar

Połączenie rygla ze słupem, wykonywane zwykle na czop i gniazdo, przenosi docisk oraz ścinanie równoległe do słupa. Analogicznie jest to w przypadku połączeń ze storczykiem lub wieszakiem.

Badania i analizy połączeń ciesielskich

W [34], [35] opisano m.in. połączenia czopowe i nakładkowe (ryc. 16) w strukturach więźb dachowych barokowych kościołów. Analizowano ich sztywność, stanowiącą złożone zagadnienie w modelowaniu konstrukcji (opisano m.in. w [8]). Zwrócono uwagę na połączenie wieszaka ze skośnymi elementami stężającymi. Do wieszaka zamocowane są dwa elementy, wzmacnione jedynie drewnianym kolkiem. Było to połączenie niezbyt mocne, prawdopodobnie więc było jego zerwanie przy pojawieniu się dużych naprężeń rozciągających, np. podczas występowania silnego wiatru. Wszystkie złącza tego typu zostały do dziś zniszczone [35]. Oznaki uszkodzenia złączy to luzy między łączonymi elementami, które mogą powstać w wyniku skurczu drewna – np. połączenia nakładkowe lub przez niedokładność dopasowania – głównie połączenia czopowe.

Badania doświadczalne oraz modele analityczne i numeryczne złączy w konstrukcjach drewnianych historycznych przedstawiono m. in. w [26], [27], [28], [36], [37].

Badania elastoptyczne i analiza numeryczna

Jedną z metod badań połączeń ciesielskich jest metoda elastoptyczna [28]. W metodzie tej buduje się model połączenia z materiałów przezroczystych, dzięki czemu możliwe jest wykorzystanie zjawisk polaryzacji światła i dwójłomności wymuszonej materiału. Jako wynik badania otrzymuje się obraz izochrom, linii będących połączeniem punktów, w których różnica naprężeń głównych jest taka sama. Pokazuje to stan naprężeń w badanych elementach.

Bazując na metodzie elastoptycznej, w [28] i [37] dokonano analizy połączeń czopowych (połączenie wieszaka z tramem) i na jaskółczy ogon (połączenie jętki z krokwią, krokwi z zastrzałem, storczyka z mieczami i tramu z mieczami) z trzpieniem drewnianym, z trzpieniem stalowym i bez trzpienia przy ściskaniu i rozciąganiu. Na podstawie otrzymanych obrazów izochrom otrzymano informacje o różnicy naprężeń głównych występujących w analizowanym obszarze. Otrzymane wartości i rozkłady naprężeń były w większości zbieżne z wynikami analiz numerycznych (ryc. 17, 18). Różnice w wynikach spowodowane są różnymi modelami przyjętymi do badań elastoptycznych, wykonanych z kompozycji żywicznej, będącej materiałem izotropowym, podczas gdy drewno jest materiałem anizotropowym. Na ryc. 17, 18 przedstawiono obraz izochrom i rozkład naprężeń dla wybranego połączenia.

way. Dovetail joints were used to connect collar beams to rafters most frequently, as they could transfer tensile forces. All solutions transfer contact pressure onto the rafter, as well as shearing forces.

Connections of the spandrel beam to the post usually involved a mortise and tenon joint, which transferred contact pressure and shearing force parallel to the post. An analogous situation takes place in the case of connections with king or queen posts.

Testing and analysis of carpentry joints

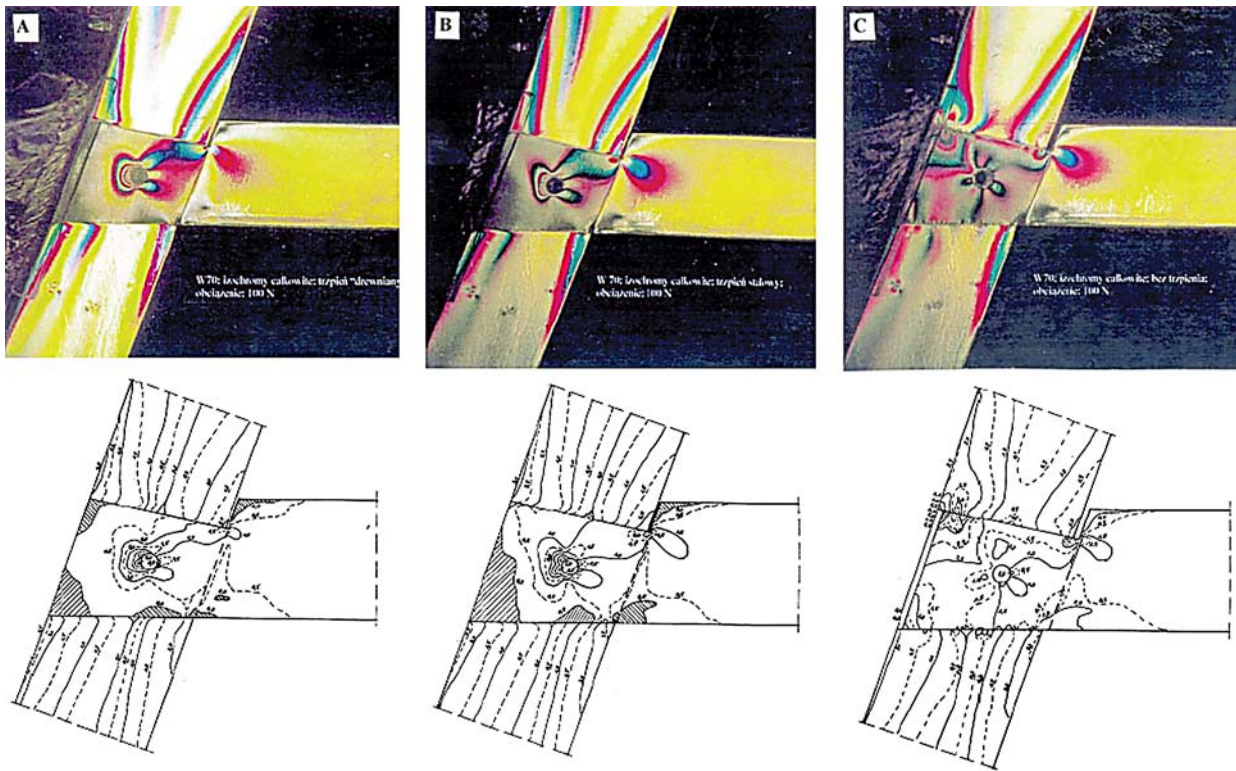
Studies [34], [35] have discussed application of *inter alia* mortise and tenon joints and lap joints (fig. 16) in the roof structures of baroque churches. Their rigidity was analysed as a complex problem of modelling building structures (described *inter alia* in [8]). Attention was paid to the connection of a king post to angled braces. The king post has two elements connected to it, strengthened only with a wooden peg. This did not make for a very strong joint, and so it was more than likely that it would be damaged with the appearance of large tensile stresses, e.g. as in the case of strong winds. All joints of this type have been destroyed [35]. An indication of joint damage is a loosening of elements, which were once joined. This arises also from wood contraction – e.g. as in lap joints or due to imprecision in matching the two elements – mostly in the case of mortise and tenon joints.

Experimental testing and analytical and numerical modelling of joinery in historic wooden building structures is discussed *inter alia* in [26], [27], [28], [36], [37].

Photo-elasticity testing and numerical analysis

One method of testing carpentry joints is photo-elasticity testing [28]. The method involves building a model of the joint using transparent material, thanks to which it is possible to use light polarisation properties and birefringence of the material. The result of the test is an isochromatic picture, which consists of a line joining points, where the difference in relation to the main stresses the same. This indicates the state of stress in the tested elements.

Based on the photo-elasticity test, an analysis [28] and [37] was carried out on mortise and tenon joints (connecting the king post to the cross-beam) and on dovetail joints (connecting the collar beam to the rafter, the rafter to the brace, the king post to angle ties and the cross-beam to the angle ties) with wooden pegs, with steel pegs and without pegging with respect to both compressive and tensile stresses. Based on the isochromatic pictures, information was obtained on the differences in the main stresses appearing in the analysed area. The values obtained and the stress distribution were in the main consistent with the results of numerical analysis (fig. 17, 18). The differences in results which appeared, could be attributed to the different models used to undertake the photo-elasticity



Ryc. 17. Wyniki badań metodą elastoptyczną dla połączenia krokwi z jętką na jaskółczy ogon przy rozciąganiu wg [28]: A – z trzpieniem drewnianym, B – z trzpieniem stalowym, C – bez trzpienia

Fig. 17. Results from photo-elasticity tests of rafter and collar-beam dovetail connections subjected to tensile stress according to [28]: A – with wooden peg, B – with steel peg, C – without peg

W badaniach elastoptycznych (ryc. 17) zaobserwowano w połączeniu z trzpieniami koncentrację izochrom przy trzpieniu od strony przeciwnej niż działanie siły. Przebieg izochrom w czopie jaskółczego ogona, w jętce i w krokwi jest podobny. Maksymalne wartości izochrom są takie same bezpośrednio przy trzpieniach. Układ i wartości izochrom wskazują, że obciążenie przenoszone jest głównie przez trzpienie. W połączeniu bez trzpienia, gdzie całe obciążenie przenoszone jest przez czop i gniazdo, czop jętki uległ znacznemu przemieszczeniu w kierunku działania siły. Koncentracja izochrom występuje wzdłuż obu krawędzi połączenia, a maksymalne wartości pojawiają się w górnym narożu jaskółczego ogona i w krokwi.

Na podstawie analizy numerycznej (ryc. 18) stwierdzono, że w połączeniu bez trzpienia (model I), przy rozciąganiu, naprężenia koncentrują się w narożach i w pobliżu naroży połączenia. W połączeniu z trzpieniem drewnianym (model II) naprężenia koncentrują się wokół trzpienia, a ich maksymalne wartości są znacznie niższe niż w przypadku połączenia bez trzpienia. W połączeniu z trzpieniem drewnianym współpracującym z czopem i gniazdem połączenia (model III) układ naprężeń świadczy o współpracy trzpienia i gniazda w przenoszeniu obciążeń. Wartości naprężeń są niższe niż w przypadku przenoszenia obciążeń tylko przez trzpień drewniany (model II).

W badaniach [28], [37] okazało się, że dla połączenia czopowego przy ściskaniu naprężenia w znacznym stopniu przenoszone są przez docisk elementu, w dużo

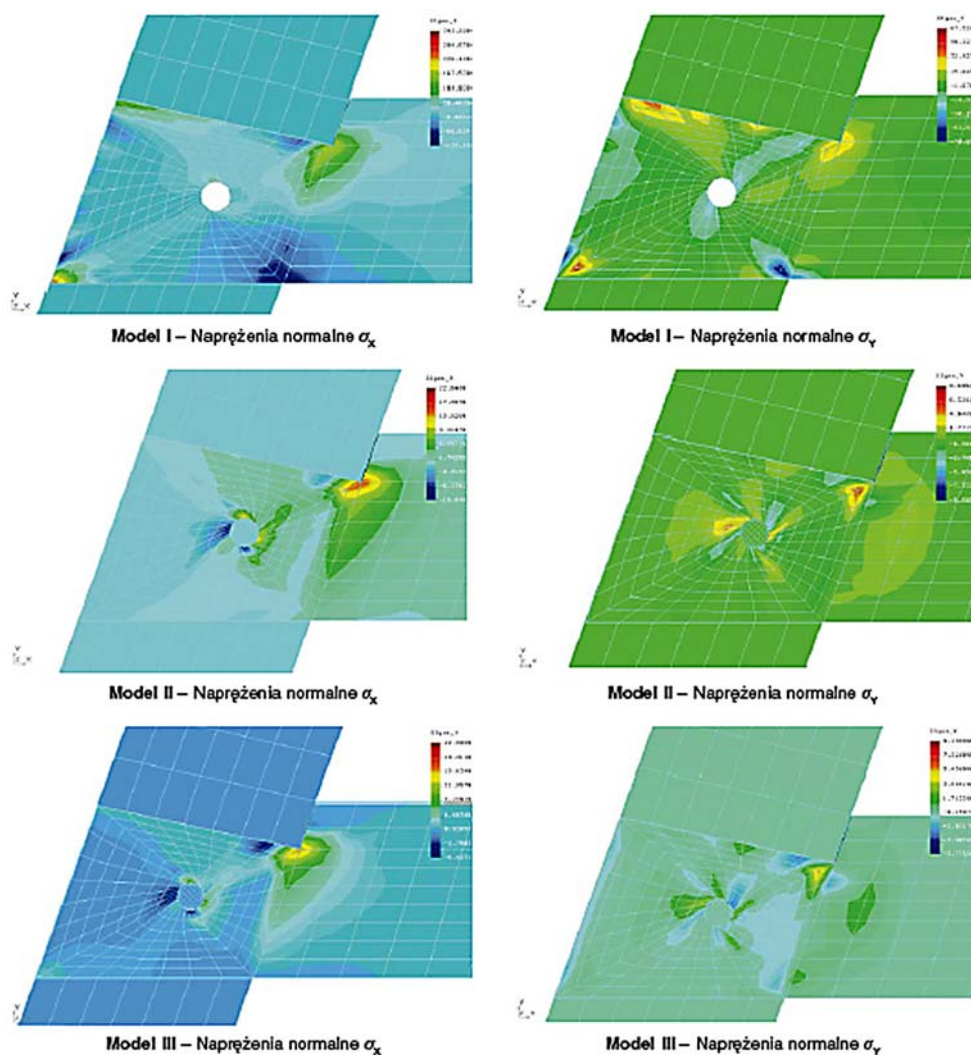
testing, which were made from resin composite, which is isotropic whereas wood is an anisotropic material. The isochromatic picture and stress distribution for the selected joint are presented in figs. 17, 18.

In the photo-elasticity testing (fig. 17), in the case of joints with wooden pegs a concentration of isochromes was observed on the opposite side of the peg with relation to the action of the force. The pattern of isochromes in dovetail tenon, in the collar-beam and in the rafter is similar. The maximum values of the isochromes are the same in the direct vicinity of the wooden pegs. The distribution and values of the isochromes indicated that loading is transferred mainly through the wooden pegs. In the joint without pegging, where the whole loading was transferred through the mortise and tenon, the tenon in the collar-beam was significantly displaced in the direction of the action of the force. A concentration of isochromes appears along both edges of the joint and maximum values appear in the upper corner of the dovetail and in the rafter.

Based on the numerical analysis (fig. 18) it was determined that in the joint without wooden peg (model I) subjected to tensile stress, stresses concentrate in corners and near corners of the joint. In the joint with wooden pegging (model II), stresses concentrate around the peg and their maximum value is significantly lower than in the case where there was no wooden pegging. In the connection where the wooden peg functions in conjunction with the mortise and

mniejszym przez trzpień. W połączeniu tego typu bez trzpienia naprężenia przenoszone przez docisk, mają mniejsze wartości. Koncentracja naprężeń występuje bezpośrednio przy trzpieniu. Przy rozciąganiu wartości naprężeń są przeciwne.

tenon joint (model III) the stress distribution confirms that the wooden peg works with the mortise and tenon to transfer loading. The values of the stresses are lower than when loading is transferred by the wooden peg alone (model II).



Ryc. 18. Wyniki analizy numerycznej dla połączenia krokwi z jętką na jaskółczy ogon przy rozciąganiu wg [28]:
 Model I – bez trzpienia, obciążenie przenosi gniazdo krokwi,
 Model II – obciążenie przenosi trzpień drewniany,
 Model III – obciążenie przenosi trzpień drewniany i gniazdo krokwi

Fig. 18. Results of numerical analysis for connections of the rafter and collar-beam with dovetail joints under tensile stress according to [28]:
 Model I – without wooden pegging, loading displaces the rafter mortise,
 Model II – loading is transferred by the wooden peg,
 Model III – loading is transferred by the wooden peg and the rafter mortise

W połączeniu rozciągany na jaskółczy ogon z trzpieniem (ryc. 17, 18) naprężenia przenoszone są głównie przez trzpień, przy czym układy izochrom i ich wartości nie różnią się zasadniczo w przypadku trzpieni drewnianych (podatnych) i trzpieni stalowych (niepodatnych).

W modelu bez trzpienia (ryc. 17, 18) obciążenie przenoszone jest przez czop oraz gniazdo i elementy ulegają znacznemu przemieszczeniu. Koncentracja naprężeń występuje wzdłuż krawędzi połączenia, maksymalne wartości pojawiają się w narożach.

Research [28], [37] found that the mortise and tenon joints when subjected to compression, transfer stresses to a significant degree through contact pressure and to a much lesser degree via the wooden peg. In joints of this type without pegging, stresses transferred through contact pressure have smaller values. Concentration of stresses appears directly in the vicinity of the wooden peg. When there is tension, the stress values are opposite.

In a dovetail joint with wooden pegging subjected to tensile stress (fig 17, 18), stresses are transferred

Maksymalne wartości izochrom są we wszystkich przypadkach większe dla połączeń bez trzpieni niż dla połączeń z trzpieniami.

Jeżeli chodzi o model zniszczenia połączenia dla połączenia czopowego bez trzpienia, odkształceniu ulegną miejsca wzdłuż krawędzi bocznych czopu. Przy rozciąganiu element łączony przemieści się zgodnie z kierunkiem działania siły, przy ściskaniu odkształci się pod wpływem mimośrodowego działania tej siły. W połączeniach z trzpieniem spodziewać się można wgniecień w czopie w obszarze łączenia z trzpieniem oraz ścięcia czopu i/lub zniszczeń w narożach i wzdłuż krawędzi bocznych czopu. Element łączony się przemieści.

Autor badań [37] zauważa, że uzyskane wyniki różnią się częściowo od obserwowanych zachowań i uszkodzeń występujących w rzeczywistych obiektach.

W analizie nie uwzględniono odkształceń wywołanych skurczem drewna, które mogą mieć znaczny wpływ na pracę połączeń (opisane w [29]).

Znaczące przybliżenie wyników badań prowadzonych metodą elastoptyczną do rzeczywistych zachowań połączeń drewnianych można uzyskać, stosując do badań modele z drewna w skali naturalnej (lub w niewielkim pomniejszeniu), pokryte warstwą optycznie czułą.

Opisane badania potwierdzają, że w połączeniach elementów występują znaczne lokalne koncentracje naprężeń oraz mogą występować przemieszczenia elementów, co może prowadzić do ich uszkodzenia.

W [26] i [27] Jasieńko i Kardysz dokonali analizy połączeń na jaskółczy ogon (jętki z krokwią oraz zastrzałą z krokwią), połączenia czopowego krokwi z belką tramową oraz połączenia krokwi i storczyka w kalenicy. Zwrócono uwagę na dobór odpowiednich parametrów materiałowych. Drewno w skali mniejszych elementów, takich jak złącza, wykazuje cechy materiału plastycznego. W analizie przyjęto model drewna jako materiał liniowo sprężysty – idealnie plastyczny, poprzecznie izotropowy, co pozwala na uzyskanie zapasu nośności, szczególnie w przypadku połączeń kołkowanych. Koncentracja naprężeń ma miejsce na powierzchni otworów na kołki. Na krawędziach otworów powstają pierwsze ślady odkształceń plastycznych. Dodatkowo analizy wykazały, że kołkowane połączenia na jaskółczy ogon mogą przenosić niewielkie obciążenia rozciągające, ulegając jednak znacznym przemieszczeniom. Obciążenie zostaje przejęte przez kołek, a naprężenia na krawędzi otworu osiągają maksymalną wartość. Wyniki badań pokazały, że odkształcenia plastyczne w połączeniach zaczynają pojawiać się już przy przemieszczeniu rzędu 2–3 mm.

W [38] przedstawiono testy wytrzymałościowe drewnianego złącza na czop i gniazdo, prowadzone na modelach pełnowymiarowych, z drewna nowego i starego, które jest typowym przykładem połączenia między krokwią a zastrzałem. Opisane zostały mechanizmy zniszczenia złącza. Zwrócono uwagę na znaczny wpływ przyjętej sztywności na zachowanie złącza. Jednym z parametrów, który, jak ustalono, ma największy wpływ na nośność złącza, jest wytrzymałość

primarily by the wooden peg. It is important to note that the distribution of isochromes and their values do not differ in any basic way in the case of wooden pegs (flexible) and steel pegs (non-flexible).

In the model without wooden pegging (fig. 17, 18), loading is transferred by the mortise and tenon and the elements sustain considerable displacement. Stresses are concentrated along edges of the joint and maximum values appear in their corners.

The maximum values for the isochromes in all cases were greater for joints without wooden pegging when compared to joints with wooden pegging.

When it comes to modes of destruction for the mortise and tenon joint without pegging, strain occurs along the side edges of the tenon. When subjected to tensile stresses, the connecting element will be displaced in the direction force is exerted, whereas when subjected to compression, the strain of the element will be caused by eccentric behaviour of the force. In joints with wooden pegs, it can be expected that there will be indentation in the tenon in the area of connecting the wooden peg and shearing of the tenon and/or damage to corners and side-edges of the mortise and tenon. The element being joined will be displaced.

One researcher [37] noted that the results obtained differ in part from observed performance of joints and damage appearing in existing building structures.

The analysis did not take into account strain generated through wood contraction, which may have a significant impact on the performance of joints (described in [29]).

Significant consistency between results obtained from photo-elasticity testing and from actual behaviour of wood joints can be obtained using wooden models at scale (or with only minor size reduction) covered with an optically-sensitive layer.

The testing described here confirms that in using joints to connect elements, significant local stress concentrations appear and that displacement of elements may occur, which may lead in turn to damage.

Jasieńko and Kardysz [26] and [27] analysed dovetail joints (collar beam and rafter, and also brace and rafter), mortise and tenon joints between rafter and cross beam, and also connections between rafters and king post at the roof ridge. They drew attention to the importance of selecting the right material parameters. At smaller scales, wood elements such as those in joints display plastic material properties. In the analysis, it was assumed for the purposes of the model that wood was linearly elastic – with ideal plasticity and isotropic crosswise, which secured reserves in load-bearing capacity, especially in the case of pegged joints. Stresses concentrated in surface areas of the peg openings. The first signs of plastic deformation appear on the edges of the openings. In addition, the analyses found that pegging a dovetail joint can transfer small tensile loads, but causes considerable displacements. Loading is taken over by the peg as the stresses at the edge of the opening reach their maximum value. Test results

na ściskanie w poprzek włókien drewna. Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien okazuje się nie mieć żadnego wpływu na wynik.

W pracy [39] autorzy zajęli się badaniami zniszczenia połączenia wrębowego w wyniku działania ścinania. Spękania skurczowe nie mają wpływu na wytrzymałość złącza na ścianie, o ile nie leżą dokładnie w płaszczyźnie ścinania. Niektóre cechy, jak sęki czy nierównomierny przebieg włókien, mogące wpływać negatywnie na charakterystyki materiału, nie mają jednak znaczenia w przypadku wytrzymałości na ścinanie.

4. METODY KONSERWACJI POŁĄCZEŃ W HISTORYCZNYCH KONSTRUKCJACH DREWNIANYCH

W wyniku działania wielu negatywnych czynników drewno w obiektach zabytkowych bardzo często narażone jest na zniszczenie. Do najczęstszych przyczyn należą zawilgocenie, rozwój szkodników biologicznych, czas eksploatacji i związane z nim procesy starzeniowe. Wybór odpowiednich metod konserwatorskich powinien w każdym przypadku uwzględniać zabytkowy charakter i wartości historyczne nie tylko obiektów jako całości, ale także poszczególnych elementów. Każdy rodzaj połączenia cechuje odmienny układ przenoszonych naprężeń, co wiąże się z różnymi mechanizmami zniszczenia i powinno być uwzględnione. W pracach [32], [33] zwrócono uwagę na to, jak istotne jest stosowanie odpowiednich metod przy wzmacnianiu złączy, gdyż niezrozumienie pracy konstrukcji i nieodpowiednie wzmocnienie często prowadzi do występowania nieprzewidzianych naprężeń, które mogą niekorzystnie wpłynąć na pracę połączenia. Niektóre z metod wzmacniania [40] wiążą się ze zmianą schematu statycznego i wymagają dokładnej całościowej analizy pracy statycznej. Działania konserwatorskie dotyczące połączeń ciesielskich opisano m.in. w [41]. Wykonuje się nowe elementy połączeń, np. kołki, klocki itp. Jest to związane z tradycyjnymi pracami ciesielskimi. Kolejną metodą jest usztywnianie przestrzeni między prętami łączonymi w węzłach. W związku z wysychaniem elementy ulegają skróceniu i zmniejsza się sztywność całej konstrukcji. Uzupełnienia wykonywane są przez wklejenie elementów z drewna twardego lub przez wypełnienie wolnych przestrzeni żywicą epoksydową. W przypadku węzłów rozluźnionych można wprowadzać do złącza nowe elementy, takie jak śruby ściągające, wkręcane kotwy stalowe, elementy z materiałów kompozytowych lub z żywic epoksydowych itp. Uszkodzone końce prętów lub całe węzły naprawia się przy użyciu nowego drewna lub kompozycji żywicznych. Dzięki tej metodzie można uzyskać początkową sztywność odtwarzanego węzła, co jest niezwykle ważne dla odkształceń całego ustroju.

Przykłady wzmocnień

W pracach [32], [33] dokonano oceny różnych technik wzmacniania tradycyjnych złączy na przykładzie po-

showed that plastic deformation in joints appear with displacements in the order of 2–3 mm.

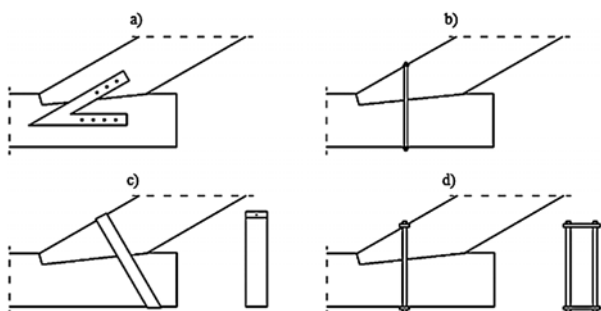
Strength tests for wooden mortise and tenon joints are presented in [38], based on full-scale models made of both old and new wood, which are typical of the joints between rafter and brace. The modes of destruction of joints are described. The research found out the significant influence of assumed rigidity on the behaviour of the joint. It was determined that the parameter, which has the largest influence on load-bearing capacity is compressive strength of wood cross-grain. Compressive strength along wood grain turns out to have no influence on the result.

In studies [39] of the destruction of notched joints, researchers focused on the results of shear stresses. Cracking due to contraction has no influence on the joint shear strength on the condition that cracks do not lie directly in the plane of shearing force. Some properties, such as knots or irregular grain of wood, which could negatively influence material characteristics, turned out not to be significant with respect to shear strength.

4. CONSERVATION METHODS FOR HISTORIC TIMBER STRUCTURES

Due to a variety of negative factors, wood in heritage buildings frequently sustains damage. The most common causes are damp, proliferation of biological pests, long-time use and related ageing processes. The selection of the most appropriate conservation methods must in every case take into account the heritage character and historic value not only of the building structure as a whole, but also its constituent elements. Every type of joint is characterised by a different arrangement for transferring stresses, which means that different modes of destruction need to be taken into account. Studies [32], [33] have drawn attention to the importance of applying appropriate methods in reinforcing joints, as failure to understand structural behaviour and inappropriate reinforcement can negatively impact joint performance. Some reinforcement methods [40] translate into changes in the static schema and require a detailed analysis of the static behaviour of the structure as a whole. Conservation actions relating to carpentry joints have been described *inter alia* in [41]. New joint elements need to be made, e.g. pegs, blocks etc. This must draw on the work of traditional carpenters. Another method is to stiffen the space between rods connected in the joint. Due to drying out, elements contract, thereby weakening the rigidity of the whole structure. Replenishment is achieved through gluing in hardwood elements or filling empty spaces with epoxy resin. In the case of loosened joints, it is possible to introduce new elements to the connection, such as internal bolts, steel tie screws, elements made of composite materials or from epoxy resins etc. Damaged rod ends or whole joints are

łączenia wrębowego. Metalowe wzmocnienia nie mają być w tym przypadku odpowiedzialne za bezpośrednie przenoszenie sił, ale za zapewnienie odpowiedniej pozycji łączonych elementów, zapewnienie ścisłości złącza i jego prawidłowego funkcjonowania w różnych warunkach. Przeprowadzono testy na modelach złączy niewzmocnionych i wzmocnionych za pomocą prostych elementów metalowych: płaskowników, śrub, obejm i ściągów (ryc. 19).



Ryc. 19. Tradycyjne metody wzmocnień połączenia na wrąb: a) płaskownik, b) śruba ściągająca, c) obejma, d) ściąg

Fig. 19. Traditional methods of reinforcing an angled notched joint: a) stirrup, b) internal bolt, c) binding strip, d) tension tie

Wzmocnienia są niezbędne w celu zapewnienia odpowiedniej pracy połączeń, w szczególności pod wpływem obciążeń cyklicznych, mogących reprezentować obciążenia sejsmiczne, lub innych nieprzewidzianych niekorzystnych warunków obciążenia. Wyniki potwierdziły, że wszystkie analizowane techniki wzmocnień powodują znaczący wzrost nośności i współczynnika tłumienia, istotnego przy zagadnieniu obciążeń cyklicznych. Spośród metod wzmocniania dla połączenia wrębowego najkorzystniejszymi okazały się: zastosowanie śrub (jedna śruba przechodząca przez połączenie osiowo – ryc. 19b) i zastosowanie metalowych płaskowników ściągniętych dwustronnie śrubami (ryc. 19a) [32], [33].

Inne badania [42] dotyczyły połączenia na wrąb czołowy i połączenia czopowego, niewzmocnionych oraz wzmocnionych za pomocą metalowych strzemion/płaskowników i ściągów. Uwzględniono również, mającą wpływ na wynik, wilgotność elementów drewnianych. Modele poddawane były obciążeniom stałym, symulującym ciężar własny oraz obciążenia z wiązarów dachowych. Stwierdzono, że głębokość wrębu wydaje się nie mieć znaczenia przy badaniu wytrzymałości złącza pod obciążeniem ciągłym. Potwierdzono też bardzo duże znaczenie dokładnego dopasowania elementów połączenia na powierzchni wrębu, gdyż w przypadku jego braku złącze traci swoją sztywność i nośność. Potwierdzono, że płaskowniki stalowe wyraźnie poprawiają zachowanie się połączeń wrębowych.

W [43] opisano pracę złącza krokwi z belką wiązarową oraz skuteczność różnych metod napraw i wzmocnień. Przeprowadzono testy dla różnych połączeń pod względem geometrii, zastosowanych elementów wzmocniających czy różnej zawartości wilgoci w elementach. Autorzy zwrócili uwagę na istotność odpowiedniego

repaired using new wood or resin composites. Thanks to this method, it is possible to attain initial rigidity of the restored joint, which is especially important for warping of the structure as a whole.

Examples of strengthening

Studies [32], [33] have assessed different techniques for reinforcing traditional joints using a notched joint as an example. Metal reinforcement in this case was not intended to transfer stresses, but rather to ensure appropriate positioning of joined elements, ensuring tightness of the connection and appropriate functioning under different conditions. Tests were carried out on models of joints without reinforcement and reinforced using simple metal elements: stirrups, internal bolts, binding strips and tension ties (fig. 19).

Reinforcement is essential for assuring appropriate performance of joints, especially with respect to cyclic loading, which could be in the form of seismic loading or other unforeseen negative loading conditions. Results confirmed that all the reinforcing techniques analysed translated into an increase in load-bearing capacity and suppression co-efficient, which is significant in the case of cyclic loading. From among methods used to reinforce notched joints, the most effective were found to be: internal bolts (a single screw passing through the axis of the joint – fig. 19b) and application of metal stirrups tightened on both sides with screws (fig. 19a) [32], [33].

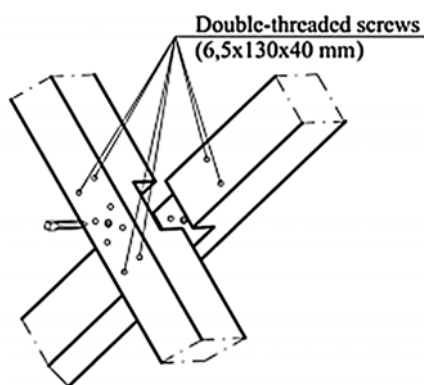
Other research [42] was concerned with leading surface notched joints and mortise and tenon joints, without reinforcement and reinforced by means of metal stirrups and tension ties. The dampness of wooden elements, which also influences results, was also taken into account. The models were subjected to continuous loading, simulating their dead load and loading transferred from roof elements. It was determined that the depth of the notch did not have any significance on strength tests in conditions of continuous loading. It was confirmed that precise matching of elements at the notch surface was of great significance as in the absence of this, the joint loses its rigidity and load-bearing capacity. It was confirmed also that the steel stirrups clearly improve the performance of notched joints.

In [43], the study is concerned with joint performance connecting the rafter with the tie-beam and the effectiveness of different methods of repair and reinforcement. Tests were carried out on different joints with respect to geometry, strengthening elements applied and on different moisture content of elements. The authors draw attention to the significance of appropriate introduction of compressive force to the rafter, which ensures a tight fit between the elements at the joint and at the same time improves its performance. For a leading surface simple notched joint without any additional metal elements, it was determined that there was no significant impact on

wprowadzenia siły ściskającej w krokwi, która zapewnia dobre przyleganie elementów w złączu i tym samym poprawne jego działanie. Dla złącza na wręb czołowy prosty bez dodatkowych elementów metalowych potwierdzono brak znaczącego wpływu wzrostu zawartości wilgoci w elementach z 12% do 20% na nośność i sztywność złącza. Dla złączy z elementami metalowymi potwierdzony został znaczący wzrost nośności przez zastosowanie wzmocnień. Wpływ zewnętrznych klamr ściskających i płaskowników jest zbliżony dla elementów drewnianych o wilgotności 12%. Ponadto wzrost zawartości wilgoci z 12% do 20% w złączach wzmocnianych elementami metalowymi okazuje się być korzystny dla wzmocnień płaskownikami ze śrubami w związku z lepszym przyleganiem między elementem drewnianym a metalowym, podczas gdy dla połączeń z klamrami dociskowymi obserwuje się redukcję nośności. Wzmocnienie wrębu czołowego śrubą przechodzącą przez połączenie zasadniczo nie zmienia początkowej sztywności złącza, zwiększa jednak jego nośność. Metoda ta zapobiega także rozłączeniu elementów łączonych, zachowując się jak zewnętrzna klamra dociskowa.

W [23] przeprowadzono analizy na przykładzie kościoła *Pieve* w Cavalese z gotycką więźbą dachową. W konstrukcjach dachowych z obszaru Włoch najczęściej występujące złącza to połączenia nakładkowe (nakładka prosta lub obustronna/wzajemna/podwójna), w jaskółczy ogon, stykowe o różnej geometrii (m.in. połączenie na znak pioruna [17]). W opisanym przypadku wszystkie złącza były kołkowane. Do połączenia elementów pod kątem stosowano połączenia wrębowe, które mogły przenosić duże naprężenia. Zastosowane metalowe gwoździe kwadratowe (poł. XVII w.) służyć miały jako wzmocnienie złączy. Kościół poddany został rekonstrukcji. Odtworzono tradycyjne połączenia i zastosowano metalowe wzmocnienia (ryc. 20).

W [44] przedstawiono podstawowe węzły w tradycyjnych więźbach dachowych na przykładzie obiektów włoskich. Połączenia często są w złym stanie technicznym, jednak są świadectwem sztuki ciesielskiej swoich czasów. Większość połączeń ma wciąż dużą wartość dla kultury i dziedzictwa kraju i w związku z tym wymagane są ich naprawy i konserwacje.



Ryc. 20. Szczegół wzmocnienia połączenia na nakładkę obustronną [23]

Fig. 20. Detail of a two-sided lap joint reinforcement [23]

load-bearing capacity and joint rigidity of increases in moisture content of the elements from 12% to 20%. For joints with metal elements, it was confirmed that significant increases in load-bearing capacity were achieved through the reinforcement applied. The impact of external ring clasps and metal plates is similar to wood elements with a 12% moisture content. Moreover, the increase of moisture content from 12% to 20% on joints strengthened with metal elements turned out to be favourable for reinforcing with metal plates with screws due to better adhesion between the wood and metal element, whereas in the case of reinforcement with ring clasps, a decrease in load-bearing capacity was observed. Reinforcement of the leading surface notch with a screw passing through the whole joint does not fundamentally change the initial joint rigidity, but it does increase its load-bearing capacity. It is a method for preventing disconnection of joined elements as it behaves as an external pressure clamp.

An analysis [23] was carried out using the example of the *Pieve* church in Cavalese, which has a gothic roof structure. Roof structures in Italy make use most commonly of the following joints: lap joints (simple lap joints or two-sided), dovetail joints, scarf joints of varying geometry (*inter alia* key locked hooked scarf with nibs [17]). All joints were pegged in the example discussed. Notched joints were used in angled connections, which are able to transfer large stresses. Square metal nails (mid 17th century) were used to strengthen the joints. The church has been renovated. Traditional joints were restored and metal reinforcement was applied (fig. 20).

The most basic connecting joints used in traditional timber roof beams are presented in [44] based on Italian building structures. Joints are often in a bad technical condition, but bear witness to the carpentry skills of their time. Most joints are still of great value in terms of national culture and heritage and so require repair and conservation.



Ryc. 21. Przykład wzmocnienia węzła przy użyciu płaskowników stalowych, kościół św. Stanisława, św. Doroty i św. Wacława we Wrocławiu

Fig. 21. Example of joint reinforcement with steel stirrups, church of St. Stanislaus, St. Dorothea and St. Wenceslaus in Wrocław

W konserwacji ścian drewnianych wieńcowych należy wziąć pod uwagę fakt, że połączenia w narożnikach stanowią najważniejszy element konstrukcji i od ich stanu zależy bezpieczeństwo całej konstrukcji [41]. Uszkodzone węgly należy uszczelnić i uzupełnić ubytki materiałowe. Uszczelnienia dokonuje się np. poprzez skręcenie bali między sobą. Ubytki w zamkach wypełnia się stosując dopasowane klocki wklejane mocowane wkrętami.

5. PODSUMOWANIE

Połączenia ciesielskie to połączenia kształtowane, w których możliwość przenoszenia obciążeń zapewniona jest poprzez odpowiednie ukształtowanie i dopasowanie do siebie elementów. Obciążenia przenoszone są poprzez siły docisku i tarcia. Z reguły połączenia te przenosić mogą naprężenia ściskające i ścinające, niektóre także niewielkie naprężenia rozciągające – jak połączenie na jaskółczy ogon. Nie przenoszą natomiast momentów zginających, dlatego w analizie konstrukcji przyjmowane są zazwyczaj jako węzły przegubowe. Pojedyncze przykłady z praktyki pokazują jednak, że istnieją połączenia, które mogą być modelowane z pewną sztywnością. Dotyczy to przede wszystkim precyzyjnie wykonanych połączeń na jaskółczy ogon. Istotną rolę w połączeniu odgrywa ją kołki (najczęściej z drewna twardego), które poddawane są ścinaniu i zginaniu. Za jakość połączenia odpowiada nie tylko jego ukształtowanie, ale także jakość wykonania. Wraz z upływem czasu, zmieniającymi się warunkami wilgotnościowymi i związanymi z tym zmianami objętości drewna i deformacjami w połączeniach nastąpić może rozluźnienie, ich jakość ulega pogorszeniu. W wyniku zawilgocenia złącza spada także współczynnik tarcia.

Podjęmowano i nadal podejmuje się zagadnienia analizy pracy statycznej połączeń ciesielskich. Wykonywane były zarówno badania na modelach rzeczywistych z wykorzystaniem różnych materiałów (modele drewniane, modele z kompozycji żywicznych), jak i opisy analityczne i testy numeryczne. Połączenia poddawano obciążeniom statycznym i cyklicznym (obciążenia sejsmiczne). Analizy miały na celu ustalenie pracy złączy, mechanizmu przekazywania sił, sprawdzenie naprężeń w poszczególnych elementach, ustalenie mechanizmów zniszczeń i ocenę roli trzpieni w połączeniach kołkowanych. Badano także skuteczność dokonanych wzmocnień, głównie z użyciem elementów metalowych. Publikacje i prace naukowe prezentują zasób informacji dotyczących połączeń ciesielskich, jednak wiedza na ten temat wciąż jeszcze nie jest kompletna i wymaga uzupełnienia. Zadaniem dzisiejszych inżynierów i badaczy jest jej pogłębienie i lepsze zrozumienie pracy statycznej połączeń realizowanych w drewnianych obiektach zabytkowych, tak aby dobierając odpowiednie metody, móc je w odpowiedni sposób utrzymywać i konserwować, zachowując przy tym ich wartość historyczną.

When conserving wooden crowned construction walls, it is important to remember that corner joints constitute the most important element of the building structure as safety of the building as a whole depends on their state [41]. Damaged quoins must be tightened and material losses replenished. Tightening is carried out for example through screwing beams to each other. Material losses in connections are replenished using customised blocks glued in and held in place with screws.

5. CONCLUSION

Carpentry joints are customised connections, which provide for transfer of loading by means of appropriate shaping and matching together of the elements to be joined together. Loading is transferred through contact pressure and friction. As a rule, these joints can transfer both compressive and shear stresses, and some can also transfer relatively small tensile stresses – as in the case of dovetail joints. They do not, however, transfer bending moments, which is why in analyses of building structures they are treated usually as hinged nodes. Individual examples from the field do show that there are joints which can be modelled with certain rigidity. This relates especially to dovetail joints, which have been made with great precision. A key role in joinery is played by pegs (most commonly made from hardwood), which are subjected to shearing and bending stresses. The quality of a joint is a function not only of its shape, but also of the quality of its realisation. With the passing of time, changing moisture conditions and related changes in wood volume and deformation, joints can become looser and their quality can deteriorate. As a result of increasing dampness of a joint, the friction co-efficient also decreases.

Analysis of the static behaviour of carpentry joints has been and continues to be a topic of interest. This has involved tests of models made from different materials (wood models, resin composite models), as well as analytical descriptions and numerical tests. Joints have been subjected to static and cyclic loading (seismic loading). The goal of these analyses was to determine joint performance, mechanisms for transferring forces, testing stresses in constituent elements, understanding modes of destruction and assessing the role of pegs in pegged joints. Research has also been concerned with the effectiveness of reinforcement previously carried out, mainly with application of metal elements. Scientific publications and studies are an information resource related to carpentry joinery, but these are still incomplete and require additional research. The challenge for today's engineers and researchers is to deepen and improve our understanding of static behaviour of joints realised in historic wooden buildings so that appropriate methods can be selected to ensure their sustainability and conservation, while preserving their historical value.

LITERATURA

- [1] Erler K., *Alte Holzbauwerke. Beurteilen und Sanieren*, Huss – Medien GmbH Verlag Bauwesen, Berlin 2004.
- [2] Trocka-Leszczyńska E., *Wiejska zabudowa mieszkaniowa w rejonie sudeckim*, Wrocław 1995.
- [3] Jasięńko J., Nowak T., Ostrycharczyk A., *Hybrydowa kopuła z drewna klejonego i stali – studium konstrukcji*, Wiadomości Konserwatorskie 30/2011, 81-93.
- [4] Tajchman J., *Propozycja systematyki i uporządkowania terminologii ciesielskich konstrukcji dachowych występujących na terenie Polski od XIV do XX w.*, Monument, Warszawa 2005.
- [5] Kopkowicz F., *Ciesielstwo polskie*, Arkady, Warszawa 1958.
- [6] Rapp P., *Historyczny rozwój ciesielskich konstrukcji dachowych w polskich kościołach*, [w:] Ganowicz R., *Historyczne więźby dachowe polskich*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań 2000, 74-95.
- [7] Mączyński D., *Znaki, inskrypcje i ślady na powierzchni drewna w zabytkowych konstrukcjach dachowych*, Wiadomości Konserwatorskie 25/2009, 28-36.
- [8] Meisel A., Bogensperger Th., Moosbrugger Th., Schickhofer G., *Historische Dachtragwerke aus Holz – Statische Analyse und Tragwirkung*, Teil 2, Bauingenieur 2 – 2013, 61-72.
- [9] PN-EN 1995-1-1:2010 – Eurokod 5: *Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków*.
- [10] Kopkowicz F., *Ciesielka wiejska i małomiasteczkowa*, Automa, Warszawa 1948.
- [11] Michniewicz W., *Konstrukcje drewniane*, Arkady, Warszawa 1958.
- [12] Lenkiewicz W., Zdziarska-Wis I., *Ciesielstwo*, WSiP, Warszawa 1989.
- [13] Sieczkowski J., Nejman T., *Ustroje budowlane*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [14] Bajon-Romańska M., *Jak budowano drewniane kościoły w średniowiecznej Małopolsce*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008.
- [15] Nowak T., Matkowski Z., *Analiza stanu konstrukcji słupowo-ryglowej w remontowanym budynku gospodarczym adaptowanym na cele mieszkalne*, Materiały Budowlane 5/2013, 12-14.
- [16] Mączyński Z., *Poradnik budowlany dla architekta*, Budownictwo i Architektura, Warszawa 1954.
- [17] Tampone G., Semplici M., *Rescuing the Hidden European Wooden Churches Heritage, An International Methodology for Implementing a Data Base for Restoration Projects*. In cooperation with Fly Events and Alter Ego Ing Arch S.r.l. (a Subsidiary Company of the Collegio degli Ingegneri della Toscana), 2006.
- [18] Perez L. P., *Design and construction of timber roof structures, built over different structural systems. Cases studium At the Valencia Community*, [in:] Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, January, 2003.
- [19] Derinaldis P. P., Tampone G., *The Failure of the Timber Structures Caused by Incorrect Design – Execution of the Joints. Two Cases Study*, [in:] Proceedings of the 16th International Conference: From Material to Structure – Mechanical Behavior and Failures of the Timber Structures, ICOMOS International Wood Committee, Florence – Venice – Vicenza, 2007.
- [20] Tampone G., *Mechanical Failures of the Timber Structural Systems*, [in:] Proceedings of the 16th International Conference: From Material to Structure – Mechanical Behavior and Failures of the Timber Structures, ICOMOS International Wood Committee, Florence – Venice – Vicenza, 2007.
- [21] Yeomans D., *How Structures Work. Design and Behavior from Bridges to Buildings*, Wiley, Blackwell, 2009.
- [22] Parisi M., Piazza M., *Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections*, Journal of Structural Engineering – ASCE 2000: 126 (12), 1395-1403.
- [23] Piazza M., Riggio M., *Typological and Structural Authenticity in Reconstruction: The Timber Roofs of Church of the Pieve in Cavalese, Italy*, International Journal of Architectural Heritage: 2007, 1(1), 60-81.
- [24] Chang, W., Hsu, M., Chen, C.J., *Estimating rotational stiffness of timber joints by using fractional experiments combined with computer simulation*, [in:] Proceeding of the 8th WCTE Conference, Lathi, Finland, June 14-17, 2004.
- [25] Piazza, M., Riggio, M., and Brentari, G., *Strengthening and control methods for old timber trusses: the queen-post truss of the Trento theatre*, [in:] Proceedings of the 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Padua, Italy, November 10-13 2004. Leiden, The Netherlands, Balkema.
- [26] Jasięńko J., Kardysz M., *Analiza pracy statycznej połączeń stosowanych w drewnianych konstrukcjach zabytkowych*, [w:] *Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych*, praca zbiorowa pod red. J. Jasięńki [i in.], Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006, 218-230.
- [27] Jasięńko J., Kardysz M., *Deformation and strength criteria in assesing mechanical behaviour of joints in historic timber structures*, [in:] Proceedings of the 16th International Conference: From Material to Structure – Mechanical Behaviour and Failures of the Timber Structures, ICOMOS International Wood Committee, Florence – Venice – Vicenza, 2007.
- [28] Jankowski L., Engel L. J., Jasięńko J., *Praca statyczna wybranych połączeń występujących w drewnianych obiektach*

- tach historycznych*, Wiadomości Konserwatorskie 18/2005, 29-41.
- [29] Yeomans D., *The repair of historic timber structures*, Thomas Telford Ltd, London 2003.
- [30] Ross P., *Appraisal and repair of timber structures*, Thomas Telford Ltd, London 2002.
- [31] Neuhaus H., *Budownictwo drewniane*, Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2006.
- [32] Branco J., Piazza M. Cruz P., *Experimental evaluation of different strengthening techniques of traditional timber connections*, Engineering Structures 2011, 33(8), 2259-2270.
- [33] Branco J., Cruz P., Varum H., *Strengthening techniques of Portuguese traditional timber connections*, [in:] Proceedings of the International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2006, New Delhi 2006.
- [34] Köck B., Holzer S. M., *Baroque Timber Roofs without a Continuous Tie – beam*, [in:] Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009.
- [35] Holzer S. M., Köck B., *Investigations into the Structural Behavior of German Baroque Timber Roofs*, International Journal of Architectural Heritage 2009, 3(4), 316-333.
- [36] Jasięńko J., Engel L. J., Rapp P., *Study of strain and stresses in historical carpentry joints by photoelasticity modeling*, [in:] Proceedings of the International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2006, New Delhi 2006.
- [37] Engel L., *Wpływ formy i konstrukcji na stan zachowania drewnianych obiektów zabytkowych*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wydział Architektury, Wrocław, 2006.
- [38] Feio A. O., Lourenço, Machado J. S., *Testing and modeling of traditional timber mortice and tenon joint*, Materials and Structures 2014, 47, 213-225.
- [39] Thoma H., Togni M., Uzielli L., *Full-Size Truss Joints Made of Old Wood: Laboratory Tests on Shear Failures*, [in:] Proceedings of the 16th International Conference: From Material to Structure – Mechanical Behavior and Failures of the Timber Structures, ICOMOS International Wood Committee, Florence – Venice – Vicenza, 2007.
- [40] Jasięńko J., *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmacnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.
- [41] Jasięńko J., Rapp P., *Metody naprawy i wzmacniania zabytkowych konstrukcji drewnianych*, [w:] *Zabytkowe Budownictwo Drewniane w Polsce – diagnostyka, wzmacnienia i zabezpieczenia*, praca zbiorowa pod redakcją Z. Mielczarka, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2008, 34-52.
- [42] Palma P., Cruz H., *Mechanical Behavior of Traditional Timber Carpentry Joints in Service Conditions – Results of Monotonic Tests*, [in:] Proceedings of the 16th International Conference: From Material to Structure – Mechanical Behavior and Failures of the Timber Structures, ICOMOS International Wood Committee, Florence – Venice – Vicenza, 2007.
- [43] Palma P., Garcia H., Ferreira J., Appleton J., Cruz H., *Behavior and repair of carpentry connections – Rotational behavior of the rafter and tie beam connection in timber roof structures*, Journal of Cultural Heritage 2012, 13S, 64-73.
- [44] Tampone G., Derinaldis P. P., Ferretti E., *The Fundamental Node of a Traditional Truss. Influence of Morphology on Efficiency*, [in:] SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures – Lisbon, Portugal – June 2011.

Streszczenie

Praca stanowi wstępne zebranie stanu aktualnej wiedzy dotyczącej historycznych złączy ciesielskich i będzie kontynuowana przez cykl publikacji w „Wiadomościach Konserwatorskich” na temat szczegółowych analiz pracy statycznej poszczególnych typów złączy.

W pracy przedstawiono rozwój połączeń ciesielskich na przestrzeni wieków oraz typologię połączeń występujących w ścianach i więźbach dachowych. Skupiono się głównie na pracy statycznej wybranych połączeń ciesielskich, przedstawiono przykłady typowych połączeń w historycznych więźbach dachowych, dokonując ich opisu i analizy. Opisano dotychczasowe badania połączeń, w tym badania metodą elastooptyczną. Następnie przedstawiono metody wzmacniania i naprawy połączeń oraz przykłady dokonanych interwencji konserwatorskich. Wyniki przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu zaprezentowano w niniejszej pracy.

Abstract

The paper represents an initial effort to review our current knowledge concerning carpentry joints and will be continued as a series of papers in the “Journal of Heritage Conservation” focused on detailed analysis of static behaviour of specific types of joints.

The paper discusses the development of carpentry joints over the centuries and presents a typology of joints found in timber walls and roof structures. The focus is mainly on the static behaviour of selected carpentry joints with presentation of examples of typical joints found in historic timber roof structures, which are described and analysed. Existing research on testing joints is reviewed, including photo-elasticity testing. Methods for reinforcement and repair of joints are presented, along with examples of heritage conservation interventions. The results of a literature review are presented in the paper.