

Rafał Nowak*
Romuald Orłowicz*

Mechanizmy uszkodzeń ceglanych nadproży łukowych

Mechanisms of brick arched lintels damage

1. Wprowadzenie

Łuki ceglane swoją popularność zawdzięczają faktowi, iż w początkach budownictwa nie znano materiałów o zdolności przenoszenia naprężeń rozciągających. Stąd konieczne było rozwiązanie, które umożliwi zbudowanie konstrukcji co przenosić tylko będzie naprężenia ściskające. Łuki najczęściej się pojawiają w nadprożach drzwiowych, nadprożach okiennych, bramach wjazdowych, sklepieniach, w mostach i wiaduktach, w stropach, w biegach schodowych. Dużo konstrukcji łukowych zachowała się do czasów teraźniejszych. Konstrukcje te zawdzięczają swoją wysoką trwałość odpowiednio dobranym kształtom tak aby linia ciśnień, będąca w funkcji obciążenia działającego na konstrukcję, znajdowała się w rdzeniu łuku wyznaczonego przez przyjętą jego geometrię. Remonty i modernizacje istniejących budynków niekiedy zwiększają i zmieniają sposób obciążenia konstrukcji. Stąd niezbędna jest wiedza o rzeczywistej pracy nadproży łukowych by móc ocenić ich zapas nośności oraz sposoby możliwego wzmocnienia. Aktualnie obserwujemy renesans nadproży łukowych. Mimo iż znamy materiały, które umożliwiają niestosowanie tego typu rozwiązań konstrukcyjnych, powraca się do nich z uwagi na duży walor architektoniczny. Natomiast w istniejących budynkach obserwuje się dużo uszkodzeń nadproży zwłaszcza w postaci spękań, zarysowań oraz wypadania cegieł.

1. Introduction

Brick arches owe their popularity to the fact that no materials capable of transferring tensile stresses were known in the beginnings of the building industry. This is why a solution making it possible to build structures designated for the transfer of compressive stress only was necessary. The arches are most often found in door and window lintels, gateways, vaults, bridges and flyovers, ceilings and flights of stairs. Many of them have survived until this day. These structures owe their high durability to their shapes chosen in such a way that the line of pressure, playing the role of the load working on the structure, was running in the core of the arch as determined by its geometry. The repairs and modernizations of the existing buildings sometimes increase and change the way the loads are distributed upon the structure. Therefore, in order to estimate the existing excess of the carrying capacity, and to be able to find the ways to strengthen the structure it is necessary to have the knowledge of the work the arched lintels actually do. Today, arched lintels are back in fashion. Although we do not need to apply such structural solutions anymore, as we know the materials that make it possible, we are rediscovering them because of their high architectural value. On the other hand, we can see that the lintels in the existing buildings are often devastated, which particularly shows in cracks, scratches and bricks that falling out.

2. Kształty nadproży łukowych

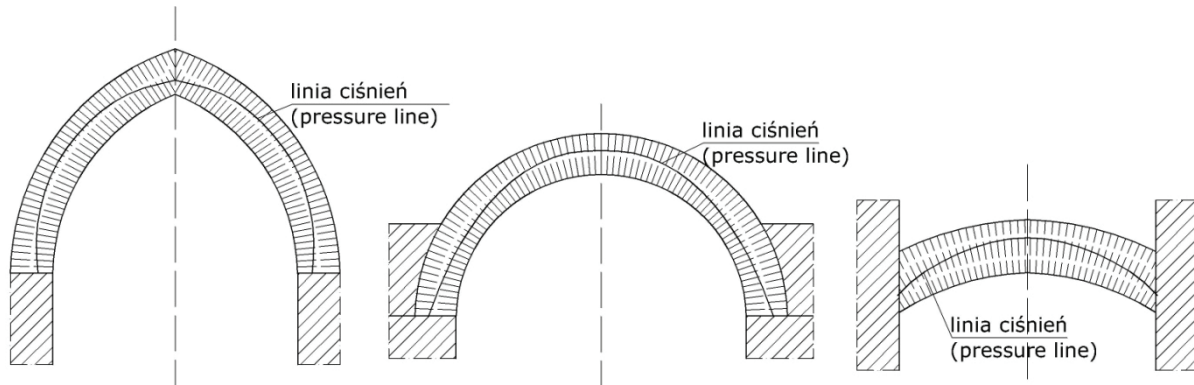
Łuki mogą posiadać dowolne kształty, co urozmaica charakter wizualny budynku. Poza tym nadproża łukowe kształtują się w zależności od przewidywanego układu obciążeń, odległości podpór, marki zaprawy i klasy cegły. Kształt nadproży łukowych decyduje o ich nośności zmieniając położenie linii ciśnień w rdzeniu (rys. 1).

Rodzaje najczęściej stosowanych kształtów łuków prezentuje rys. 2, natomiast w tab. 1 podano zalecane grubości łuku od jego kształtu [1].

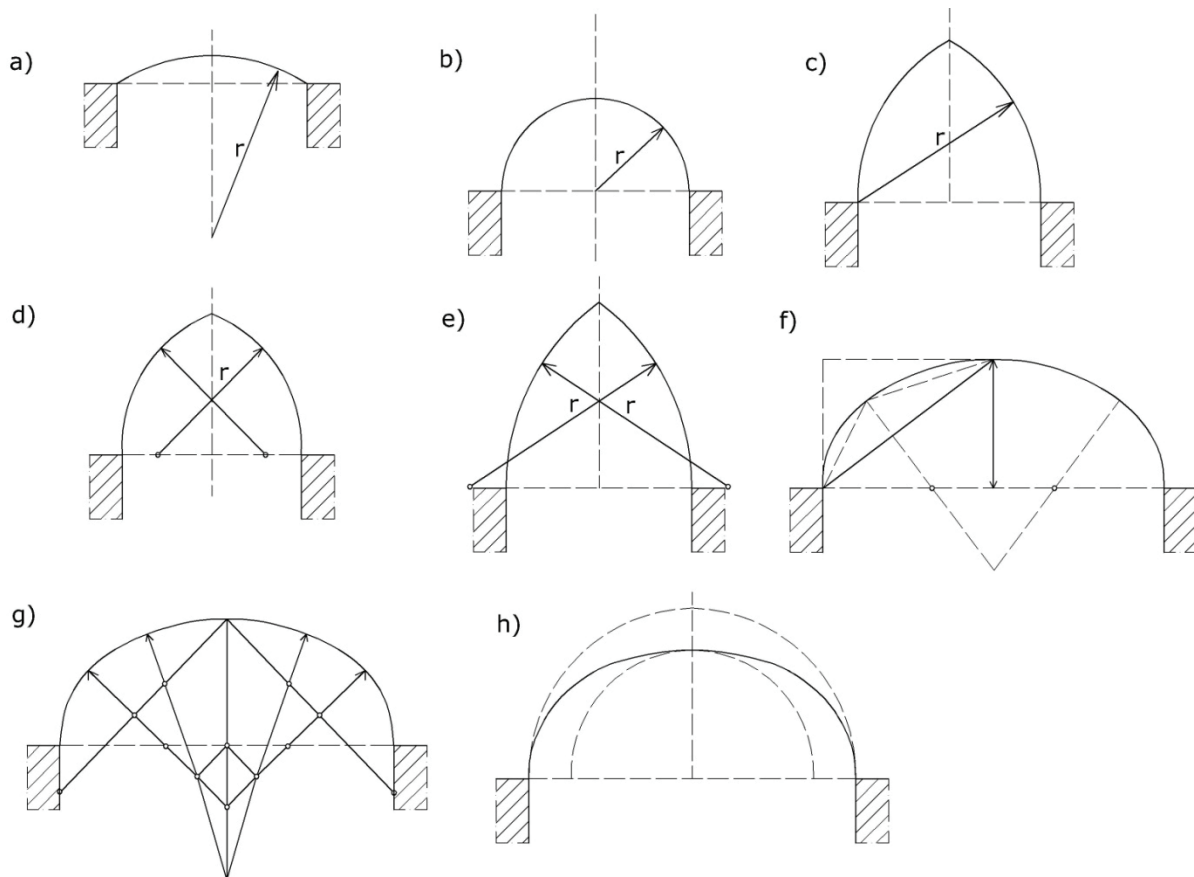
2. The shapes of arched lintels

Arches may be of any shape, diversifying to a great extent the visual character of the building. Arched lintels are also shaped depending on the expected load distribution, support intervals, mortar brand and brick class. The shape of arched lintels is decisive when it comes to their carrying capacity because it changes the location of the line of pressure in the core thereof (fig. 1).

Fig. 2 shows the most frequently used types of arch shapes, while the recommended thickness of the arch for a given shape [1] is laid out in table 1.



Rys. 1. Schemat zmiany linii ciśnień w zależności od kształtu łuku [6]
Fig. 1. Changes of pressure line depending on arch shapes [6]



Rys. 2. Kształt nadproży łukowych: a – łuk odcinkowy, b – łuk półkolisty, c – łuk gotycki, d – ostrołuk obniżony, e – ostrołuk podwyższony, f – łuk koszowy z trzema punktami środkowymi, g – łuk koszowy z pięcioma punktami środkowymi, h – łuk eliptyczny
Fig. 2. Shape of arched lintels: a – segmental arch, b – semicircular arch, c – Gothic arch, d – lowered ogive, e – heightened ogive, f – valley arch with three central points, g – valley arch with five central points, h – elliptical arch

Tab. 1. Grubość łukowych nadproży ceglanych [1]
Thickness of brick arched lintels [1]

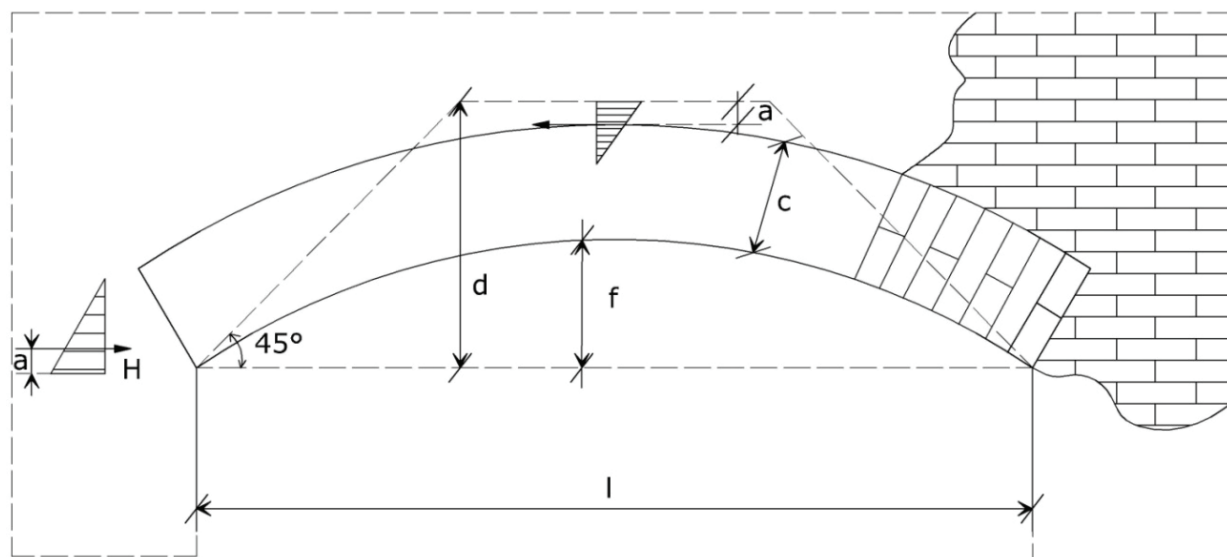
Rozpiętość nadproża [m] Thrust of the arch of the lintel [m]	Grubość łuku [cegły] Thickness of the arch [bricks]		
	Łuk półokrągły Semicircular arch	Łuk gotycki i podwyższony Gothic arch and heightened ogive	Ostrołuk obniżony Lowered ogive
1,88 – 2,00	1	1/2	1,5
2,00 – 3,00	1,5	1	1,5
3,50 – 5,75	2	1,5	2
5,75 – 6,00	2,5	1,5	2,5
6,00 – 8,50	2,5	1,5	2,5

3. Nośność nadproży

Do końca XIX wieku stosowano jedynie empiryczne sposoby wyznaczania nośności ceglanych nadproży łukowych [1]. Następnie została opracowana uproszczona metoda obliczeń według schematu przedstawionego na rys. 3 [6, 7].

3. Carrying capacity of lintels

By the end of the 19th century only the empirical ways of determining the carrying capacity of brick arched lintels [1] were applied. Then a simplified method of calculations was worked out according to the analysis chart presented in fig. 3 [6, 7].



Rys. 3. Schemat obliczeniowy dla odcinkowych nadproży łukowych
Fig. 3. Analysis chart for segmental arched lintels

Według tej metody rozpór H określa się wzorem:

$$H = M / (d - 2a) \quad (1)$$

gdzie: M – moment zginający w środku rozpiętości, $d = c + f$ – obliczeniowa wysokość nadproża, a – odległość wypadkowej trójkątnego wykresu naprężeń ściskających do krawędzi nadproża.

Obciążenie nadproży stanowi część muru usytuowanego nad łukiem oraz reakcję oporową stropów lub więźby dachowej (rys. 4). Doświadczalne wartości parametrów c i a w zależności od marki zaprawy i klasy cegły podano według [6, 7] w tab. 2. W tabeli tej przytoczono również maksymalne wartości rozpiętości l_{\max} nadproży w zależności od strzałki f . Według badań doświadczalnych nisz-

According to this method the thrust of an arch H is calculated in accordance with the following formula:

where: M – the bending moment in the centre of the thrust of an arch, $d = c + f$ – the computational height of the lintel, a – the distance of the resultant of the triangular graph of compressive stresses to the edge of the lintel.

The load carried by the lintels is imposed by a part of the wall situated over the arch. It is also the bearing reaction of the ceilings or the rafter framing (fig. 4). The experimental values of parameters c and a depending on the mortar brand and brick class have been shown in table 2 [6, 7]. The maximum values of the thrust of an arch l_{\max} of lintels depending on the arch rise f have also been

czenie nadproży odcinkowych ($f/l = 1/8 - 1/12$) następuje gdyż rozpór H przekracza wytrzymałość muru na ścinaniu wzdłuż spoin wspornych. Natomiast moment zginający wywołuje rozciąganie dolnej strefy nadproża co stanowi przyczynę jego spękania lub wypadanie cegieł. Poza tym nadproża sprawdza się na ścinanie w poprzek spoin wspornych [6]. Na skutek oddziaływania momentu zginającego i sił poprzecznych przy małych wysokościach d nadproża może powstać układ trójprzegubowy (rys. 4a).

cited in this table. The experimental study showed that the destruction of the segmental lintels ($f/l = 1/8 - 1/12$) takes place because the thrust of an arch H exceeds the strength of the wall on shearing along the supporting joints, while the bending moment results in stretching the bottom zone of the lintel causing the crackings to appear or bricks to fall out. Besides, lintels are tested for shearing across the supporting joints [6]. As a result of the impact of the bending moment and transverse forces, a triple hinged system (fig. 4a) for small heights d of the lintel might form.



Rys. 4. Zniszczenie ceglanego nadproża łukowego z uwagi na: a – powstanie ustroju trójprzegubowego, b – powstanie wtórnego łuku
 Fig. 4. Damage of brick, arched lintels' construction because of: a – triple-hinged framework, b – derivative arch

Tab. 2. Zależności obliczeniowe dla nadproży łukowych [6, 7]
 Computational correlation for arched lintels [6, 7]

Marka zaprawy [MPa] Mortar brand [MPa]	l_{\max} [m]		c/l	a/c	
	Strzałka f/l Arch rise f/l			Klasa cegły [MPa] Brick class [MPa]	
	1/8 – 1/12	1/5 – 1/6		7,5	5,0
10	3,5	4	0,06	0,10	–
5	3	3,5	0,06	0,12	0,15
3	2,5	3	0,06	0,15	0,25
0,8	2	2,5	0,08	0,20	0,25
0,4	1,75	2,25	0,10	0,25	0,30

Warto nadmienić, że praca nadproży różni się od pracy sklepień przede wszystkim z uwagi na inną formę przekazywania obciążeń (zasypka, posadzka nad sklepieniem) [3]. Natomiast wiotkie nadproża o dużych rozpiętościach i małych stosunkach c/l można obliczać jako sklepienia [6]. Z doświadczeń wynika, że wyżej wymienione teoretyczne stany graniczne nośności rzadko występują w rzeczywistości. Dotyczy to zwłaszcza ostrołuków. W istniejących metodach obliczeń nie uwzględnia się współpracy łuków z usytuowanymi nad nimi warstwami muru. O współpracy łuku z tymi warstwami lub z całym pasmem międzyokiennym świadczy charakter spękań w obszarze nadproży (rys. 4b).

4. Morfologia spękań

Na rys. 5 podano najczęściej spotykane układy zarysowań i spękań odcinkowych nadproży łukowych. Próbę klasyfikacji tych uszkodzeń autorzy podjęli wykorzystując własne doświadczenie (ekspertyzy, projekty napraw, badania laboratoryjne) oraz opisy i fotografie dostępne w literaturze. Różnaita morfologia spękań wynika ze złożonego stanu naprężeń panującego w obszarze nadproży [4]. Decydujący wpływ mają naprężenia normalne rozciągające i styczne. Wypadanie cegieł z łuku (schemat a na rys. 5) lub jego spękanie w zworniku (schemat b) świadczy o przekroczeniu naprężeń rozciągających wywołanych momentem zginającym M wytrzymałości muru na rozciąganie w poprzek spoin wspornych. Rozwidlenie pęknięcia pionowego (schemat d) pojawia się zwykle w strefie oparcia belki stropowej. Natomiast powstanie wtórnego łuku ze zwornikiem w miejscu oparcia belki stropowej (schematy f, g, h) świadczy o współpracy wyżej usytuowanych poziomych warstw muru z nadprożem łukowym. Należy zaznaczyć, że według zaleceń projektowych [6] grubość tych warstw powinna być nie mniej jak 38 cm przy rozpiętości nadproża do 1,5 m i nie mniej jak 45 cm przy rozpiętości powyżej 1,5 m. Spękania ukośne pasma międzyokiennego (schemat l) związane jest z jego pionowym odkształceniem postaciowym wywołanym nierównomiernym osiadaniem podłoża. Szczególnymi przypadkami są spękania poziome (schemat i) i pionowe na całą wysokość pasma międzyokiennego (schematy e, c, k). Takie spękania powstają zwykle w nadprożach usytuowanych przy ścianach szczytowych na skutek oddziaływania nie zrównoważonego rozporu H . Z doświadczeń wynika, że im większa strzałka nadproży łukowych f/l i im mniejsza rozpiętość l , tym są one mniej wrażliwe na

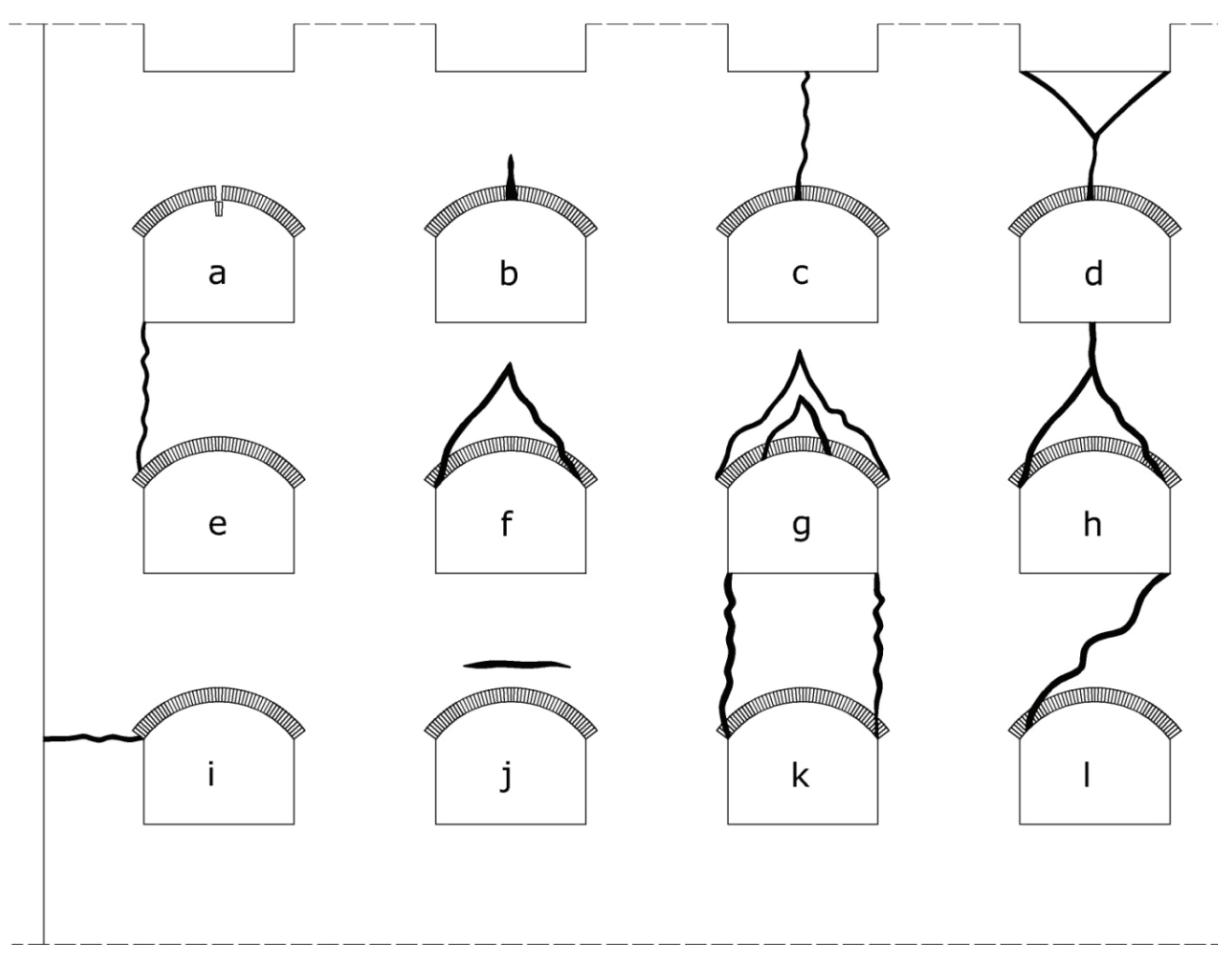
It is worth mentioning that the work of lintels differs from the work of vaulting first of all in that the way the loads are transferred is different (backfill, floor over the vault) [3]. However slender lintels of large thrust of an arch and low ratio c/l may be calculated as vaults [6]. Experiments have shown that in practice the above mentioned theoretical boundary states of carrying capacities are rare. This is particularly true about ogives. The existing methods of calculation do not take into account the co-operation of arches with the layers of the wall situated over them. The character of cracks in the area of lintels testifies that such co-operation of an arch with these layers or with the whole strand between the windows does exist (fig.4b).

4. Morphology of cracks

Fig. 5 shows the most frequent arrangements of cracks and scratches of segmental arched lintels. The authors have attempted to classify these damages using their own experience (evaluations, repairs projects, laboratory tests) as well as descriptions and photos found in the literature. Various morphology of the cracks results from the complex status of stresses in the area of lintels [4]. Normal tensile stresses and tangential stresses are decisive in this context. The bricks falling out of the arch (pattern a, fig.5) or fracturing in the coupling piece (pattern b) shows that the tensile stress produced by the bending moment M has exceeded the tensile strength of the wall across the supporting joints. The fork of the vertical crack (pattern d) usually appears in the area of floor joist bearing. However, the fact that a derivative arch with the coupling piece has been formed in the point of floor joist bearing (patterns f, g, h) shows the co-operation of the horizontal layers of the wall situated above with the arched lintel. It should be pointed out that the project recommends [6] the thickness of these layers to be no less than 38 cm for the thrust of an arch of lintel up to 1.5 m and no less than 45 cm for the thrust of an arch above 1.5 m. The slanting cracks running in the strands between the windows (pattern l) are connected with their vertical deformation due to uneven sagging of subsoil. The horizontal (pattern i) and the vertical cracks extending throughout the whole height of the strands between the windows (pattern e, c, k) are specific cases. Such cracks usually appear in the lintels situated near the gable walls as a result of the influence of non-balanced thrust of an arch H . This shows that that the larger the arch rise of arched lintels f/l is and the smaller thrust of an arch l is, the less sensitive to scratches

zarysowania i spękania. Pod tym względem najbardziej bezpieczne i trwałe są nadproża w postaci ostrołuków. Znacznie mniej zarysowań występuje w nadprożach nie obciążonych stropami.

and cracks the lintels are. From this point of view, the ogival lintels are the most safe and durable. There are considerably fewer scratches occurring in the lintels which are not put under the load of floors.



Rys. 5. Morfologia zarysowań i spękań w obszarze nadproży łukowych
Fig. 5. Morphology of scratches and cracks in arched lintels' nearness

Warto nadmienić, że propagację zarysowań i spękań potęguje oddziaływanie dynamiczne wywołane np. ruchami pojazdów lub urządzeń technologicznych. Pod takim obciążeniem następuje (zwłaszcza wskutek poluzowania i utraty przyczepności cegły do zaprawy) rozkruszenie struktury muru [5]. Obniża się wtedy wytrzymałość muru zwłaszcza na rozciąganie i ścinanie. Ten stan naprężeń zawsze panuje w strefie nadproży zarówno łukowych jak płaskich i klinowych, w związku z czym są one bardzo wrażliwe na oddziaływanie dynamiczne [6].

5. Podsumowanie

Zarysowania i spękania murów w strefie nadproży nie tylko pogarszają użyteczność budynku, lecz mogą doprowadzić do awarii. Istniejące ceglane nadproże łukowe pracuje w złożonym stanie naprężeń, a przybliżone metody ich obliczeń nie w pełni odzwierciedlają rzeczywiste mechanizmy

It is worth mentioning that propagation of scratches and cracks is enhanced by dynamic influences such as the movement of vehicles or technological devices. Under such loads (especially as a result of slackening and the loss of adhesiveness of the brick to the mortar) the wall structure crushes [5]. The strength of the wall deteriorates, especially in terms of resistance against tension and shearing. Such stresses prevail in the area of arched, flat and wedge-shaped lintels, which makes them very sensitive to dynamic influences [6].

5. Summary

Not only do the scratches and cracks of walls in the area of lintels worsen the usability of a building, but they also can result in a collapse. The existing brick arched lintel works under a complex state of stresses, and the methods of approximate calculation thereof do not fully reflect the actual mechanisms of destruc-

zniszczenia. W metodach tych np. nie uwzględnia się współpracy łuków z usytuowanymi nad nimi warstwami muru. Prowadzone przez autorów badania rzeczywistej pracy ceglanych nadproży łukowych w istniejących budynkach mają na celu oszacowanie ich rzeczywistej nośności i dokonania wyboru właściwych sposobów napraw.

tion. These methods do not take into account such factors as the co-operation of arches with the layers of the wall situated over them. The investigations of the actual work of brick arched lintels in the existing buildings, carried out by the authors, are aimed at estimation of their actual carrying capacity and selection of the proper methods of repairing.

Literatura • References

- [1] Bargmann H., *Historische Bautabellen*, Normen Und Konstruktionshinweise 1870 – 1960, Auflage, Werner Verlag 2008.
- [2] Janowski Z., Hojdys Ł., Krajewski P., *Sklepienia zabytkowe – Klasyfikacja, ocena stanu technicznego i nośności, naprawy i wzmocnienia*, XXII Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji, 7-10 marca 2007, Szczyrk, PZITB, Bielsko-Biała 2007.
- [3] Jasińko J., Łodygowski T., Rapp P., *Naprawa, konserwacja i wzmocnianie wybranych zabytkowych konstrukcji ceglanych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006
- [4] Kindracki J., *Nośność ścian ceglanych w strefie otworów okiennych*, Rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. R. Orłowicza, Gliwice 1999.
- [5] Małyszko L., Orłowicz R., *Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko- Mazurskiego, Olsztyn 2000.
- [6] Oniszczyk L., *Kamiennye konstrukcji*, Strojizdat, Moskwa 1939.
- [7] *Tablice inżynierskie*. Tom III, Państwowe wydawnictwo naukowe, Poznań 1958.

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska
West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland

Streszczenie

Niniejszy artykuł zawiera aktualną wiedzę o budowie łukowych nadproży. Zostało udowodnione, że dobrze znana teoria różni się od faktycznych prac budowlanych i że sprawdza się tylko w sporadycznych przypadkach. Dokonano analizy danych typowych typów morfologicznych pęknięć i rys. Wydział Inżynierii lądowej i Architektury Zachodu pomorskiej Politechniki rozpoczął badanie nad opisanym zagadnieniem.

Abstract

The following article contains the current knowledge about construction of arched lintels. It had been proved that well – known theory differs from actual construction work and it proves correct only in occasional cases. There was made statistic analysis of typical morphological types of cracks and scratches. Department of Civil Engineering and Architecture in The West Pomeranian University of Technology has started research on the described issue.