

Kopuły historyczne a metody konserwacji drewna

Barbara Misztal

Wydział Architektury, Politechnika Wroclawska

Streszczenie: W artykule zestawiono różne rozwiązania systemów konstrukcyjnych historycznych kopuł z drewna litego układając je w typologiczny szereg obejmujący kopuły o rozpiętości od kilku do 67,0 metrów średnicy rzutu poziomego. Wiele z nich uległo zniszczeniu w pożarach wywołanych wojnami lub przez ludzką ignorancję. O trwałości drewna w konstrukcji decydują również metody konserwacji, w które coraz częściej wkraczają współczesne materiały i technologie. Wykorzystując analogię budowy drewna do kompozytów włóknistych omówiono zmniejszenie nośności ściskanych prętów z drewna z powodu uszkodzenia komórek miękiszowych (jako lepko-sprężystej matrycy) na skutek zastosowania niewłaściwych metod i preparatów w konserwacji. Sformułowano kryterium wyboru materiałów termoizolacyjnych wbudowywanych w bliskim sąsiedztwie drewna. Zarekomendowano materiały o stałym współczynniku λ w przedziale naturalnych zmian wilgotności stropów i dachów. Materiały o pełnych, nie nasiąkliwych włóknach, takie jak wełna mineralna i wata szklana nie spełniają tego kryterium.

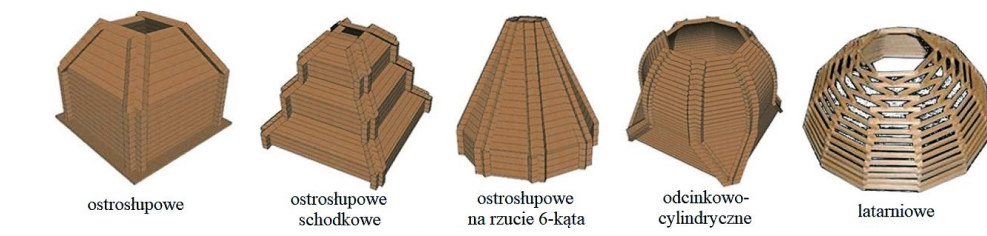
Słowa kluczowe: kopuły z drewna litego, kompozyty włókniste, materiały termoizolacyjne.

1. Wprowadzenie

Trwałość obiektów architektury drewnianej zależy od zachowania właściwości fizykochemicznych oraz budowy mikroskopowej drewna w czasie budowy i eksploatacji obiektu. Podatność drewna na wpływ środowiska spowodowała, że od wieków stosowano różnorodne metody jego zabezpieczenia. Niestety wiele rozwiązań konstrukcji z drewna uległo zniszczeniu i zapomnieniu w tym kopuł z drewna litego. W tabeli 1 zestawiono trzydzieści cztery najwybitniejsze przykłady kopuł z drewna litego układając je w siedem podstawowych typów konstrukcji.

Tabela 1. Typologia historycznych konstrukcji kopuł z drewna litego [1]

1. Przekrycia kopuło-podobne



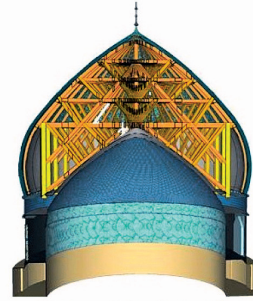
2. Wielopowłokowe kopuły budowane na Bliskim Wschodzie



Jerozolima, Kopiała na Skale,
691, D=20,40m



Jerozolima, Meczet Al-Aqsa,
715, D=11,50m



Meczet Masdżet-e Shan
Isfahan, Iran, 1630, D=21,40m

3. Kopyły na rusztowaniach



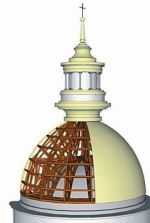
Venice,
Saint Mark's Basilica,
1094, D=10m



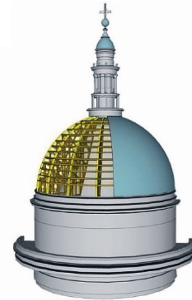
Venice,
Il Redentore,
1592, D=14.5m



Venice,
Santa Maria della Salute,
1687, D=20.5m



Paris,
Saint-Louis-des-Invalides,
1693, D=29.0m



London,
Saint Paul Cathedral,
1715, D=32.0m



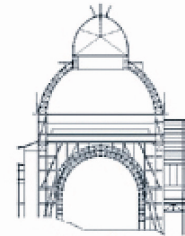
Würzburg,
Die Schönbornkapelle,
1736, D=24.0m



Karlsruhe,
1814, D=30.0m

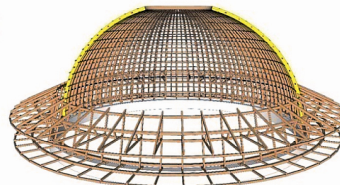
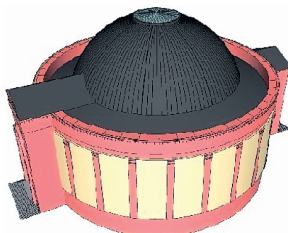


St Petersburg Cathedral,
1826, D=26.0m

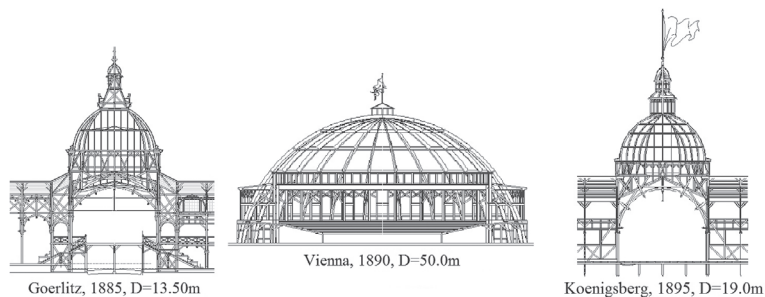


Kopenhagen,
1888, D=26.50m

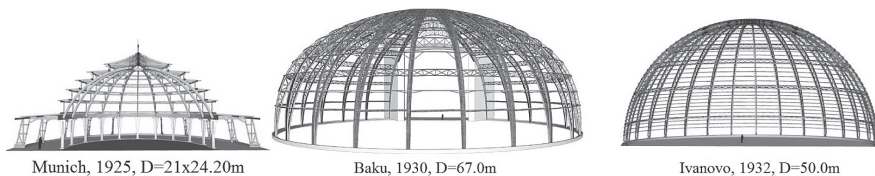
4. Kopyły żebrkowe na żebrach z krążyn



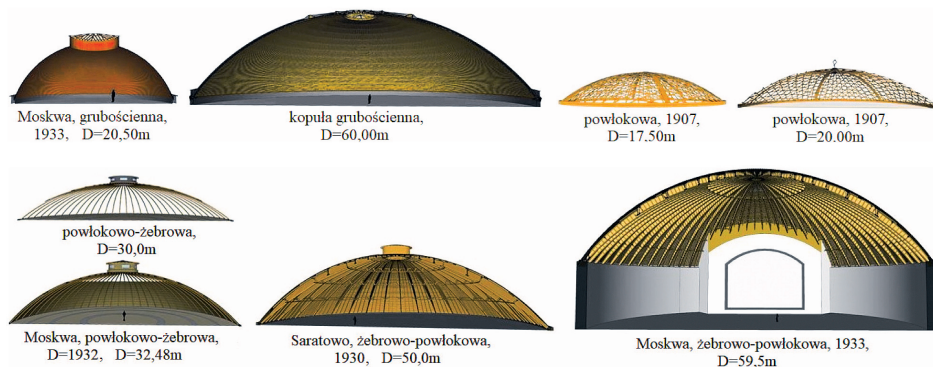
Darmstadt, Ludwigskirche, 1827, D=33.5m



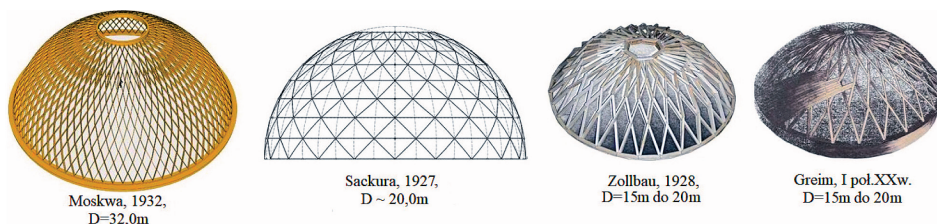
5. Kopuły żebrowe



6. Kopuły powłokowe



7. Kopuły siatkowe



Nieliczne informacje, w istniejącej jeszcze historycznej literaturze, posłużyły autorce do odtworzenia podstawowych typów konstrukcji kopuł. W poz. 1, tab. 1, umieszczono przekrycia kopuło-podobne, budowane z bali łączonych na wręby. W poz. 2. tab.1 pokazano widoki kopuł budowanych na Bliskim Wschodzie. W poz. 3, tab. 1, pokazano wybrane przykłady kopuł na rusztowaniach z drewna. Elementem zewnętrznym rusztowania są

łuki z krążyn nadających kształt kopule. Konstrukcja kopuł na rusztowaniach przechodziła kolejne przeobrażenia. W 1827 r. architekt niemiecki G. Moller zastosował wielowarstwowe łuki z krążyn jako żebrową konstrukcję kopuły w kościele św. Ludwika w Darmstadt [1] pokazaną w wierszu 4, tab. 1. Po raz pierwszy wyeliminowano rusztowanie podpierające łuki, wprowadzając czytelną konstrukcję żebrową kopuły. W poz. 5, tab. 1 pokazano wybudowane w Rosji w latach 1930–1931 kopuły żebrowe na nośnych żebrach kratowych o kształcie kratownicy bipolarnych. W poz. 6, tab. 1, pokazano schematy kopuł powłokowych z drewna o najmniejszym w historii rozwoju konstrukcji drewnianych, zużyciu materiału i stalowych łączników w przeliczeniu na 1m² wybudowanego obiektu. Kopuły powłokowe budowano w dwu podstawowych systemach powłokowych: grubościennych i cienkościennych. W poz. 6, tab. 1 pokazano kopuły o masywnej powłoce: gładkie o średnicy do kilku metrów, oraz użebrowane o średnicy do 60,0 m. Kopuły cienkościenne w zależności od cech przekroju zespolonego¹ autorka podzieliła na: powłokowe gładkie, na żebrach z płaskich desek, powłokowe na żebrach z desek sprężonych ściągamymi stalowymi, powłokowo żebrowe na żebrach z kilku warstw desek, żebrowo powłokowe na żebrach kratowych o kształcie bipolarnym. Istotnym etapem rozwoju kopuł drewnianych były powłoki budowane z siatki krzyżulców zastępujących południkowe żebra, pokazane w poz. 7, tab. 1. Podział rombów sfery odróżnia siatkowe kopuły z drewna litego od współczesnych siatkowych kopuł stalowych i drewniano stalowych.

Na historycznych przykładach pokazanych w tabeli 1 można zaryzykować tezę, że estetyka i zachowanie wybitnych przykładów architektury drewnianej zależy od umiejętnego stosowania metod zabezpieczających właściwych dla włóknistej budowy drewna.

Aby zwrócić uwagę na problemy konserwacji drewna należy wspomnieć o jego włóknistej budowie.

2. Budowa drewna

Metody budowania i zabezpieczania obiektów z drewna powinny uwzględniać właściwości wynikające z budowy anatomicznej naturalnego kompozytu włóknistego jakim jest drewno. W pracy [2] opisano skład chemiczny i włóknistą budowę drewna. W gatunkach konstrukcyjnych wymiary typowe włókien wynoszą około: długość ~3500÷4000μm, średnica ~ 1/15 do 1/20 długości włókna. Włókna drzewne o różnorodnym upakowaniu, rozmieszczone są w masie komórek miękiszowych (rys. 1b). Komórki miękiszowe jako żywe, odznaczają się podatnością lepko-sprężystą, natomiast komórki tworzące włókna drzewne to komórki martwe, usztywniające kompozyt. Na rys. 1 pokazano włóknistą budowę drewna jodły (*Abies alba*) w przekroju stycznym w różnym powiększeniu.

Wykorzystując analogię budowy drewna do kompozytów włóknistych na rys. 2 pokazano model wybożenia pojedynczego włókna drzewnego w uszkodzonej masie komórek miękiszowych. Sprężyny symbolizują lepko-sprężyste właściwości komórek miękiszowych. Elipsami zaznaczono obszary utraty matrycy spowodowane np. korozją biologiczną, oddziaływaniem wysokiej temperatury, preparatów chemicznych.

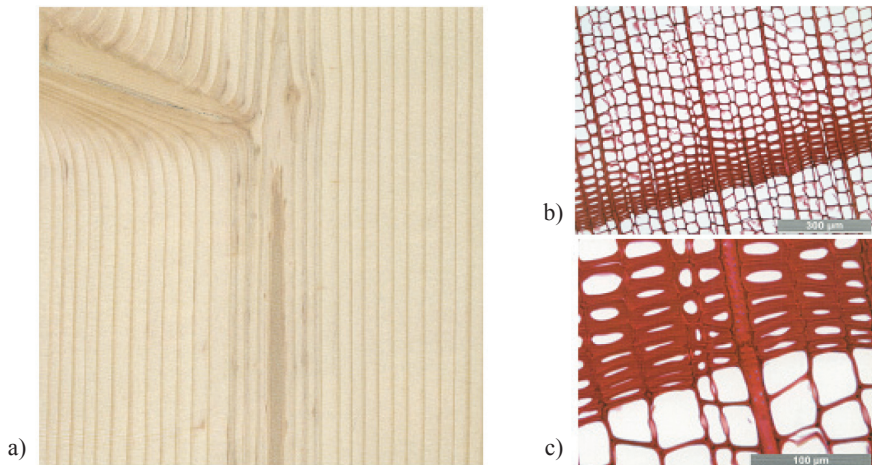
Włókno drzewne obarczone wstępnym wygięciem δ_0 pokazano linią: przerywaną w początkowym położeniu, ciągłą po wybożeniu. Włókno ściskane wybacza się w kierunku przestrzeni pustych powstałych na skutek zniszczenia matrycy (na rys. 2 – brak sprężynek). Brak dostatecznego zamocowania włókien w matrycy powoduje wzrost ugięcia y , co skutkuje

¹ Nazwą „konstrukcja zespolona zebra z powłoką” określa się typ konstrukcji, a nie rodzaj połączenia

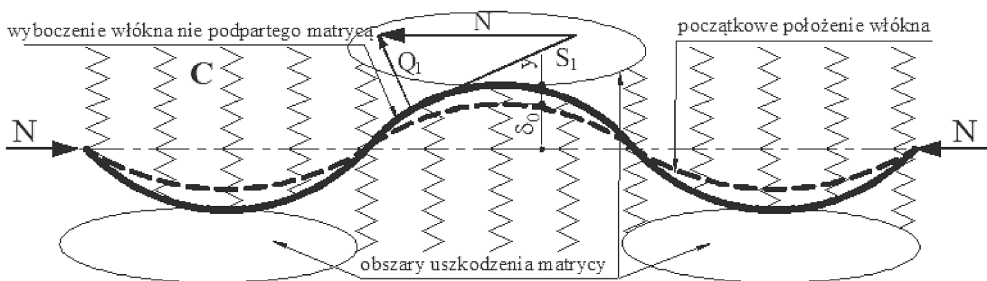
lavinowym pękaniu włókien drzewnych pod wpływem sił poprzecznych generowanych przy ścisnaniu.

W pracy [5] i [1] pokazano, że nośność kompozytu włóknistego zależy od zamocowania włókien w lepko-sprężystej matrycy. Zjawisko wybożenia pojedynczych włókien w matrycy lepko-sprężystej tzn. w masie komórek miękiszowych, przekłada się na globalną nośność ściskanych prętów z drewna zwłaszcza dla małej smukłości $\lambda < 10$ [5].

Wraz z rozwojem chemii budowlanej, używane są preparaty chemiczne niszczące biologiczne szkodniki drewna: grzyby, pleśnie i owady. Stosuje się również metody fizyczne w tym wyparzenie drewna w temperaturze od 190°C do 240°C pod ciśnieniem. W pracy [4] opisano wpływ metod impregnacji ogniochronnym środkiem solnym pod ciśnieniem na wytrzymałość drewna. Badano wytrzymałość na zginanie, na ściskanie i na rozciąganie, statycznie i dynamicznie. W każdym przypadku zanotowano spadek wytrzymałości w stosunku do próbek nie impregnowanych. Metody oddziaływania na drewno w celu jego zabezpieczenia mogą powodować uszkodzenie komórek miękiszowych podobnie jak szkodliwe oddziaływanie środowiska. Do degradacji drewna przyczynia się również powszechne stosowanie niewłaściwych materiałów termoizolacyjnych w sąsiedztwie drewna.



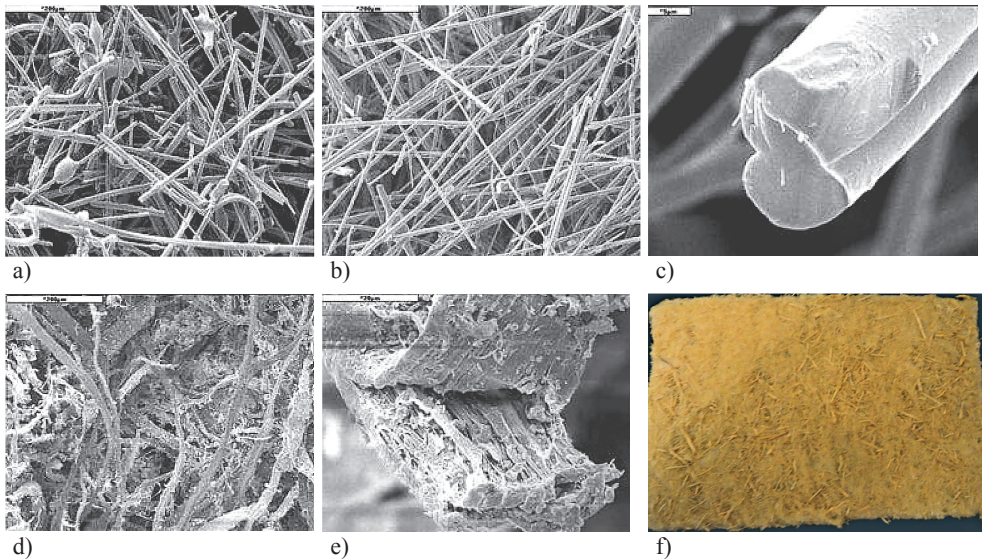
Rys. 1. Włóknista budowa drewna jodły (*Abies alba*), a – przekrój styczny, b, c – przekrój styczny w powiększeniu [3]



Rys. 2. Wybożenie włókna ściskanego obciążonego wstępnym wygięciem δ_0 w ośrodku lepko sprężystym komórek miękiszowych

3. Wpływ na drewno wybranych materiałów termoizolacyjnych

Współczesne wymogi ograniczające straty ciepła w budynkach wymuszają stosowanie różnorodnych materiałów termoizolacyjnych. Coraz częściej termomodernizację przeprowadza się również w zabytkowych obiektach historycznych. Najczęściej stosowanym materiałem jest wełna mineralna, a nawet wata szklana. Na rys. 3 przedstawiono fotografie mikroskopowe materiałów termoizolacyjnych wg [6] o włóknach pełnych z wełny mineralnej (rys. 3a) i waty szklanej (rys. 3b,c), oraz o włóknach porowatych z granulatu celulozy (rys. 3d,e) i maty z włóknem drzewnych (rys. 3f).



Rys. 3. Różnice w budowie, w widoku mikroskopowym, wybranych materiałów termoizolacyjnych: a) włókna wełny mineralnej, b) włókna waty szklanej, c) pojedyncze włókno waty szklanej, d) włókna celulozy, e) pojedyncze włókno celulozy [6], f) mata z włóknem drzewnych (fot. aut.)

W przypadku pomieszczeń użytkowych posiadających przegrody o konstrukcji z drewna, wentylowanych w okresie niskich temperatur na zewnątrz, z wnętrza budynku płynie strumień zużytego powietrza, a wraz z nim strumień pary wodnej. Jeżeli wilgoć nie zostanie wchłonięta przez włókna materiału termoizolacyjnego będzie gromadzić się początkowo na powierzchni, później zacznie opadać grawitacyjnie w matach. Następstwem grawitacyjnego opadania wilgoci w matach z wełny mineralnej lub szklanej jest zmiana właściwości izolacyjnych. Zawilgocona wełna mineralna czy wata szklana staje się przewodnikiem, a nie izolatorem. W zawilgoconym materiale izolacyjnym, w sąsiedztwie pożywki, którą jest drewno, nastąpi rozwój korozji biologicznej.

Wskazane jest stosowanie termoizolacji zbudowanej z włókien o porowatej budowie pochłaniającej wilgoć wcześniej, zanim grawitacyjnie ulegnie skropleniu. Takim produktem są włókna drzewne, także granulaty w postaci luźnych włókien celulozy, nasączonych związkami blokującymi rozwój korozji biologicznej. Porowata powierzchnia i włóknista struktura pojedynczych włókien (rys. 3e) powoduje, że ma on zdolność podciągania kapilarnego i gromadzenia wilgoci. Przy ciągłej wymianie powietrza wydalanie nadmiaru wilgoci

między włóknami jest skuteczne dzięki dużej powierzchni parowania porowatych włókien. Podobny mechanizm wymiany wilgoci z otoczeniem obserwuje się w matach termoizolacyjnych z wiórów drzewnych (rys. 3f).

Wełna mineralna czy wata szklana w powiększeniu mikroskopowym to cienkie włókna, o pełnym przekroju, kamienne lub szklane, nie wchłaniające wilgoci – rys. 3c). Jeżeli nasycenie parą jest wysokie, wilgoć skrapla się grawitacyjnie pomiędzy włóknami. Inaczej jest gdy włókna są higroskopijne. Po zamknięciu izolacji w pierwszej kolejności wilgoć chłona włókna, a w przestrzeniach pomiędzy włóknami utrzymuje się powietrze. Dzięki tej właściwości granulatu celulozy i maty z wiórów drzewnych zachowują stały opór cieplny – współczynnik λ , aż do zawilgocenia wynoszącego do około 23% wilgotności materiału [6]. Dla wełny mineralnej czy waty szklanej maksymalna wilgotność przy niezmiennym współczynniku oporu cieplnego λ wynosi 7%. Naturalne zmiany wilgotnościowe w stropodachu w ciągu roku wynoszą 6–14%. W wełnie mineralnej zmiana współczynnika przewodnictwa cieplnego λ następuje już przy wilgotności 7% [6].

Uzupełniając powyższe informacje należy dodać, że od czerwca 2000 r. w Niemczech obowiązuje zakaz obrotu, produkcji i wykorzystania biotrwiałych sztucznych włókien mineralnych w izolacji cieplnej i akustycznej budynków oraz w izolacjach technicznych [7]. Zakaz regulowany jest przez „Rozporządzenie o zmianie Prawnych Rozporządzeń dotyczących Chemikaliów” (Verordnung zur Änderung chemikalienrechtlicher Verordnungen) [7]. W pracy [7] omówiono zagrożenia dla zdrowia związane ze stosowaniem włókien mineralnych, a zwłaszcza mineralnej wełny izolacyjnej. Zgodnie z dyrektywą 98/98/WE Unii Europejskiej z 1998 r, wełna mineralna została sklasyfikowana jako drażniąca i rakotwórcza (kategoria 3) [7]. W pracy [7] nie omawia się t. zw. granulatu z wełny mineralnej stosowanego powszechnie w Polsce do ocieplania stropów i dachów. Jest to materiał luźny, o zmiennych właściwościach termoizolacyjnych, wyjątkowo toksyczny dla ludzi. Tak zwany granulatu z wełny mineralnej jest niekorzystny szczególnie w kontakcie z drewnem.

4. Wnioski

Nie kontrolowane stosowanie preparatów chemicznych, wpływ temperatury i wilgoci na drewno prowadzi do uszkodzenia matrycy, w której rozmieszczone są włókna drzewne. Niedostateczne zamocowanie włókien w matrycy przekłada się na zmniejszenie globalnej nośności ściskanych prętów z drewna [1].

Jako kryterium wyboru materiału termoizolacyjnego znajdującego się w bliskim sąsiedztwie drewna rekomenduje się materiały o porowatej budowie włókien i stałym współczynniku λ w przedziale naturalnych zmian wilgotności stropów i dachów. Wełna mineralna i wata szklana nie spełniają tego kryterium.

Literatura

- [1] Misztal B. *Wooden domes*. Wydawnictwo Springer, 2017.
- [2] Kozakiewicz P., Matejak M. *Klimat a drewno zabytkowe*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2002.
- [3] Godet J.D. *Atlas drewna*. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2008.
- [4] Bednarek Z., Kaliszek-Wietecha A. *Wytrzymałość drewna impregnowanego ogniochronnym środkiem solnym metodą próżniowo-ciśnieniową*. 50-ta Jubileuszowa Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZTIB „Krynica 2004” 12–17 września 2004 roku.

- [5] Kowal Z. *Nośność krytyczna słupów drewnianych jako kompozytów włóknistych*. Sympozjum – Drewno i Materiały Drewnopochodne w Konstrukcjach Budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 05–06 września.
- [6] Ugolik A. *Ekofiber*: www.ugolik.pl/ekofiber.html
- [7] Tarkowski S., Krajewski J.A. *Materiały izolacyjne zawierające sztuczne włókna mineralne – zagrożenia*. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 3 (2002) 16–20.

Historical domes versus wood preservation methods

Barbara Misztal

Faculty of Architecture, Wrocław University of Science and Technology

Abstract: The paper collates various solutions of the structural systems of historical domes made from solid wood by arranging them into a typological series including domes of a span from several up to 67.0 metres of the horizontal projection's diameter. Many of them were destroyed in fires or out of human ignorance. Preservation methods, in which modern materials and technologies appear, determine the wood durability in a construction. Through using the analogy of wood structure to fibrous composites, the reduction in the carrying capacity of compressed wooden bars due to a damage of parenchymatous cells (as a visco-elastic matrix) in consequence of having applied improper preservation methods and preparations was discussed. The selection criterion of thermo-insulating materials embedded in a close vicinity of wood was formulated. The materials of a constant coefficient λ within the range of natural variations of the moisture content of ceilings and roofs were recommended. The materials of full, not absorbable fibres, such as rock wool and glass wool, do not meet this criterion.

Keywords: domes from solid wood, fibrous composites, thermo-insulating materials.