

dr inż. Jarosław Malesza*
 prof. dr hab. inż. Czesław Miedziałowski*
 dr inż. Mikołaj Malesza*

Badanie konstrukcji szkieletowego budynku drewnianego w skali naturalnej

The study of wood-framed sheathed building in full scale

Budynki o konstrukcji szkieletu drewnianego ze współpracującym jedno- lub obustronnym poszyciem są coraz częściej technologią realizacji budownictwa mieszkaniowego o zabudowie jednorodzinnej lub szeregowej do dwóch kondygnacji naziemnych. W USA, Wielkiej Brytanii czy krajach skandynawskich zaawansowane są technologie wznoszenia tego typu konstrukcji do pięciu kondygnacji. To powoduje problemy natury zarówno konstrukcyjnej, jak i technologicznej. Tradycyjnie szkieletowe budownictwo drewniane to konstrukcja szkieletu drewnianego o przekroju do 50 x 150 mm w rozstawie 625 lub 413 mm z obustronnym współpracującym konstrukcyjnie poszyciem z płyt drewnopochodnych typu OSB 12 mm lub płasko prasowanej płyty wiórowej 12,5 mm, połączonych ze szkieletem łącznikami typu trzpieniowego. Rolę łączników pełnią zszywki, wkręty lub gwoździe o odpowiednim rozstawie wzdłuż krawędzi elementów drewnianych.

Jedyną technologią zapewniającą jakość i zgodność z wymaganiami jest Platform Framing w zmienionej formie w postaci wielkowymiarowych tarcz ściennych, stropowych i sporadycznie dachowych zależnie od pomysłu architekta i formy pozwalającej na wykonawstwo konstrukcji dachu z wielkowymiarowych elementów. Technologia ta pozwala na produkcję taśmową elementów wielkowymiarowych tarcz ściennych o wysokości kondygnacji i długości całej ściany. Element taki ma wbudowane okna, drzwi i instalacje pozwalające na szybki montaż.

Wielkoelementowe budynki o prefabrykowanej konstrukcji szkieletu drewnianego wymagają szczególnego trak-

towania, ponieważ:

- przemysłowa produkcja tarcz ściennych, stropowych i elementów konstrukcji dachu wymaga przestrzegania przepisów i reżimu technologicznego;
- Eurokod PN-EN 1990 wymaga 50-letniego okresu użytkowania budynku z zachowaniem klasy konsekwencji zniszczenia CC2 i klasy niezawodności RC2 oraz wskaźnika niezawodności $\beta = 3,8$ dla stanu granicznego nośności, co narzuca bardzo rygorystyczne wymagania dotyczące stosowanych materiałów, rozwiązań projektowych oraz zgodności z projektem podczas realizacji. Te wymagania mogą być spełnione tylko w warunkach przemysłowej produkcji w zakładzie zapewniającym odpowiednie procedury kontrolne.

Zagadnienia badawcze

Obecnie bardzo ważne zagadnienia badawcze, to:

- jakość wykonania połączeń fragmentów ścian, stropów, dachu z konstrukcją przyległą [2; 7; 8];
- ustalenie zakresu obciążeń doraźnych tych elementów, wynikającego z analizy całokształtu konstrukcji i rozdziału obciążeń na poszczególne elementy w przestrzennym układzie budynku [1; 2];
- ustalenie zakresu obciążeń długotrwałych i określenie wpływu efektu czasu na połączenia. Niektóre z badań realizowano, a ich wyniki przedstawiano w [3; 4];
- określenie charakterystyk podatności takiego typu połączeń [8; 9; 10; 11; 12].

Zagadnienia te są szczególnie ważne, biorąc pod uwagę narastające w ostatniej dekadzie oddziaływania czynników atmosferycznych i reakcje

konstrukcji budynków na te oddziaływania (odpowiedź konstrukcji). Zwiększone obciążenia śniegiem i wiatrem (niejednokrotnie katastrofalne) wymuszają inne podejścia do zagadnień projektowania szczególnie lekkich konstrukcji, a takimi są szkieletowe budynki drewniane o ciężarze 1 kN/m², w odróżnieniu od tradycyjnych konstrukcji ciężkich, gdzie ten wskaźnik wynosi 4 – 5 kN/m². Coraz częściej projektowane są również budynki, gdzie wnętrze jest pozbawiane ścian konstrukcyjnie usztywniających, co wymaga analizy przestrzennej tego typu rozwiązań i wprowadzania elementów usztywniających niejednokrotnie ukrytych w konstrukcji.

Analizę sztywności przestrzennej i charakterystyki podatności konstrukcji całych budynków o różnym stopniu nasycenia elementami usztywniającymi z zachowaniem wymagań architektury prowadzono w Wydziale Budownictwa Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej [3; 4; 7; 8]. Badania w skali naturalnej zrealizowanych już budynków w fazie bez wykończenia i z wykończeniem stanowią istotny element poznania odpowiedzi złożonej trójwymiarowej konstrukcji budynku na odpowiednie poziomy i zakresy obciążeń, szczególnie poziomych. Nie wolno jednak obciążeń poziomych traktować jako jedynego niebezpiecznego stanu obciążeń. Istotne jest poznanie zachowania się konstrukcji w złożonym stanie obciążeń.

Poziomy obciążeń muszą być dostosowane do zmieniających się uwarunkowań atmosferycznych i uwzględniać efekt wpływu czasu. Określenie charakterystyki obciążenie – przemieszczenie oraz zachowania się połączeń w całej konstrukcji, zarówno doraźnie jak i w czasie, jest podstawowym ele-

* Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

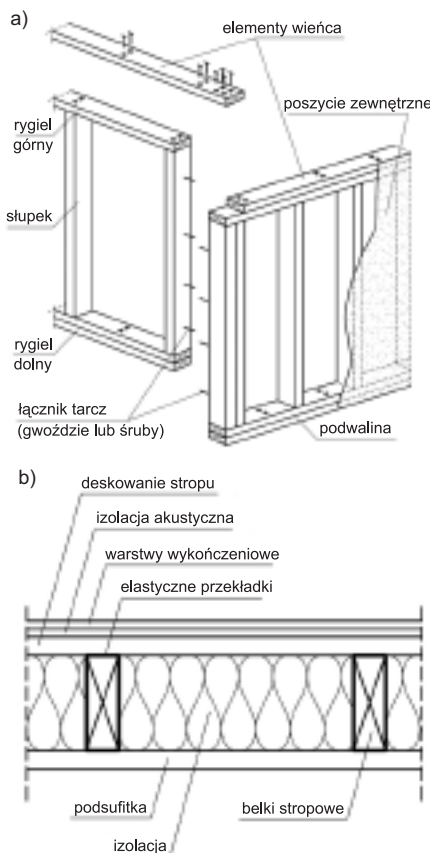
mentem poznawczym [8]. Kolejne zagadnienie to opis i określenie zmian powstających w konstrukcji, wpływ tych zmian na materiał i złącza, ograniczenie lub utrata stanu granicznego nośności w wyniku niestarannego wykonania, penetracji wilgoci i jej wpływu na charakterystyki materiałowe, a w rezultacie na bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji.

Badania autorskie miały na celu:

- określenie deformacji i wielkości przemieszczeń budynku pod działaniem obciążeń poziomych;
- analizę sztywności poszczególnych elementów i całej bryły budynku;
- porównanie uzyskanych wielkości przemieszczeń ze stanami granicznymi użyteczności;
- wstępną analizę pracy przestrzennej bryły budynku;
- analizę wpływu ukształtowania bryły budynku, złączy oraz połączeń międzyelementowych i innych nieciągłości na pracę przestrzenną budynku.

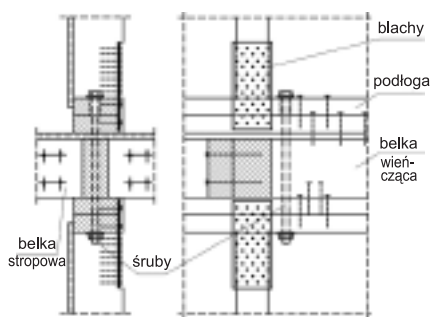
Opis konstrukcji budynku

Do badań wybrano szkieletowy parterowy budynek drewniany, z mieszkalnym poddaszem, z współpracującym poszyciem, zrealizowany w technologii wielkowymiarowych tarcz ściennych, stropowych i dachowych [5]. Piwnica wraz ze stropem stanowiąca kondygnację podziemną została zrealizowana w monolitycznej technologii żelbetowej. Parter o wysokości konstrukcyjnej ze stropem 2,74 m i poddasze mieszkalne przekryto dachem w konstrukcji drewnianej krokwiowo-płatwiowej o nachyleniu połaci 45° pośrednio za pośrednictwem słupków nośnych poddasza na stropie nad parterem. Tarcze ścienne o konstrukcji szkieletowej drewnianej z obustronnym poszyciem (rysunek 1a) wykonano z drewna świerkowego, a słupki nośne ścian i rygle poziome (dolny i górny) z drewna litego o przekroju 45 x 135 mm o rozstawie osiowym 600 mm, z obustronnym poszyciem. Jako poszycie wewnętrzne zastosowano płytę wiórową płasko prasowaną grubości 12 mm, a jako zewnętrzne płytę gipsowo-celulozową 12,5 mm. Płyta stropowa (rysunek 1b) została wykonana z belek z drewna litego o przekroju poprzecznym 60 x 180 mm i rozstawie 450 mm oraz z podwójnych belek 2 x 60 x 180 mm w rozstawie 400 mm w przypadku rozpiętości stropów od-



Rys. 1. Elementy konstrukcji przegród: a) płyta ścienna; b) płyta stropowa

powiednio 3,00 i 3,90 m. Poszycie stropu stanowi płyta wiórowa grubości 19 mm, natomiast od dołu zastosowano płytę gipsowo-kartonową grubości 12,5 mm. Śruby M12 o rozstawie 100 mm na obwodzie budynku i gwoździe N 5.0/150 mm zastosowano jako łączniki tarczy stropowej ze ścianami parteru (rysunku 2). Drewniane krokwie dachu o przekroju 45 x 180 mm o rozstawie osiowym 625 mm stanowią konstrukcję tarcz dachowych nośnych. Poszycie z płyt wiórowych 12 mm i płyty gipsowej 12,5 mm od dołu stanowi konstrukcję nośną dachu.

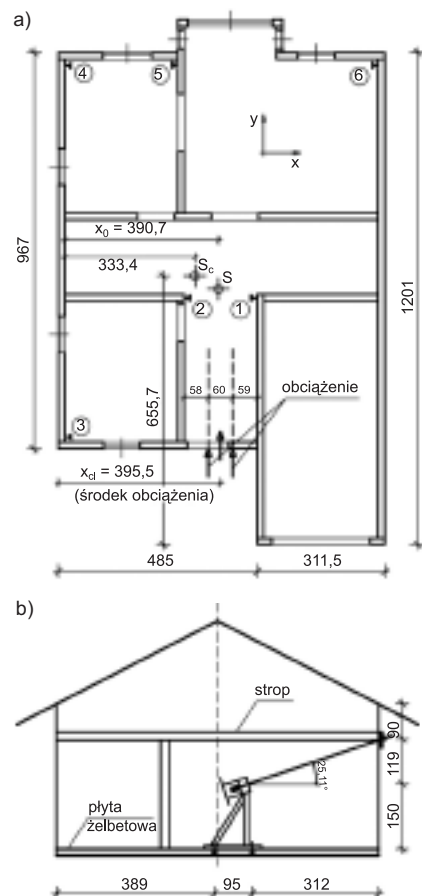


Rys. 2. Połączenie ścian ze stropami za pomocą śrub i blach

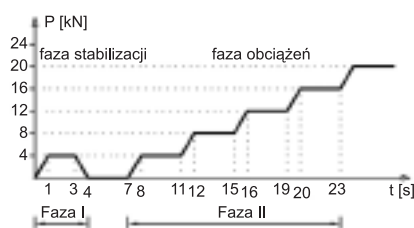
Badania doświadczalne konstrukcji nośnej szkieletowego budynku drewnianego

Budynek, którego rzut i przekrój pokazano na rysunku 3, obciążono obciążeniem poziomym na wysokości stropu. Obciążenie realizowano za pomocą stalowych cięgien, siłownika i konstrukcji oporowej zmontowanej na stropie stanu zerowego (rysunek 3b). Fazy obciążenia konstrukcji budynku oraz wartości przykładanego obciążenia przedstawiono na rysunku 4. Faza I miała na celu ustabilizowanie obciążeń i przemieszczeń, $P_s = 4,0$ kN. Faza II polegała na badaniu budynku do zakresu obciążeń poziomych eksploatacyjnych (wiatrem), $P_e = 24,0$ kN, a następnie do wielkości obciążenia $P_u = 40,0$ kN.

W trakcie badania mierzono przemieszczenia ścian w poziomie dolnej krawędzi stropu w kierunkach prostopadłym i równoległym do kierunku



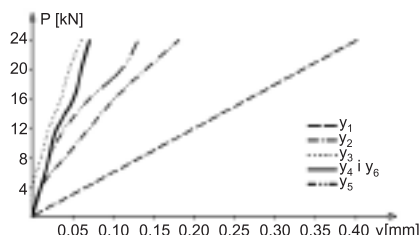
Rys. 3. Układ ścian budynku i schemat obciążenia konstrukcji budynku: a) rzut parteru; b) przekrój



Rys. 4. Fazy badania konstrukcji budynku

zadawanego obciążenia. Do pomiaru zastosowano czujniki zegarowe o dokładności 0,01 mm i czujniki indukcyjne PELTRON PS x 50. Odczyty wykonywano po zrealizowaniu każdego przyrostu obciążenia o wartości 4,0 kN. Usytuowanie miejsc pomiarowych na planie budynku pokazano na rysunku 3a.

Wybrane wyniki przemieszczeń ścian w funkcji sztywnościowego rozdziału na poszczególne ściany obciążenia globalnego nałożonego na cały budynek przedstawiono w tabeli. Odczyty przemieszczeń budynku w miejscach pomiarowych pokazano na rysunku 5.


Rys. 5. Przemieszczenia ścian dla poszczególnych poziomów obciążeń budynku ($y_1 - y_6$; punkty pomiarowe)

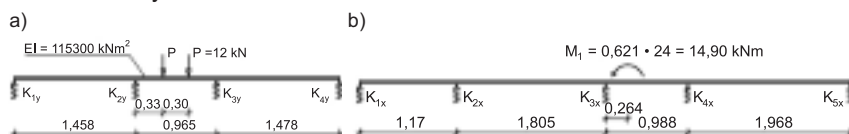
Obciążenia przyłożone w trakcie badań przemieszczenia ścian

Całkowite obciążenie na budynek P [kN]	Obciążenie na poszczególne ściany i przemieszczenia (punkty pomiaru przemieszczeń wg rys. 3a)											
	ściana 3 P [kN]	punkt 1 [mm]	ściana 2 P [kN]	punkt 2 [mm]	ściana 1 P [kN]	punkt 3 [mm]	ściana 4 P [kN]	punkt 4 [mm]	ściana 5 P [kN]	punkt 5 [mm]	ściana 6 P [kN]	punkt 6 [mm]
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	1,100	0,067	0,987	0,010	0,650	0,000	0,650	0,010	0,987	0,010	1,264	0,010
8	2,200	0,133	1,974	0,040	1,300	0,010	1,300	0,020	1,974	0,020	2,529	0,020
12	3,300	0,200	2,962	0,070	1,950	0,020	1,950	0,030	2,962	0,040	3,793	0,030
16	4,401	0,267	3,949	0,100	2,600	0,035	2,600	0,050	3,949	0,070	5,058	0,050
20	5,502	0,333	4,936	0,140	3,250	0,045	3,250	0,060	4,936	0,110	6,322	0,060
24	6,603	0,402	5,923	0,180	3,800	0,060	3,800	0,070	5,923	0,130	7,586	0,070
28	7,703	0,503	6,910	0,230	4,550	0,075	4,550	0,100	6,910	0,160	8,851	0,080
32	8,803	0,635	7,898	0,310	5,200	0,115	5,200	0,130	7,898	0,190	10,115	0,090
36	9,904	0,790	8,885	0,410	5,850	0,150	5,850	0,170	8,885	0,260	11,380	0,120
40	11,004	0,933	9,872	0,510	6,500	0,190	6,500	0,210	9,872	0,330	12,641	0,160

Stan graniczny użytkowalności w świetle wymagań normowych

W stosunku do wymagań jednoznacznie określonych w normie DIN 1052 pomierzone wartości nie przekraczają dopuszczalnych przemieszczeń górnej krawędzi ściany przy poziomie eksploatacyjnym obciążeń będących wynikiem parcia wiatru. Wartości tych przemieszczeń ograniczone są do wielkości $y_{lim} = 0,002 \cdot h_s$ i w przypadku wysokości ściany $h_s = 2,70$ m wynoszą $y_{lim} = 5,48$ mm.

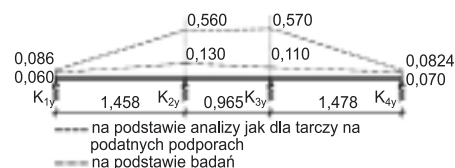
Analizę sztywności poszczególnych ścian budynku i rozdział obciążenia zewnętrznego przeprowadzono, przyjmując charakterystyki doświadczalne $P = f(\delta)$ uzyskane przez autorów w trakcie badań tarcz o różnej konstrukcji i geometrii [4]. Rozdział obciążeń wewnętrznych na poszczególne ściany budynku przyjęto wg schematu belki na podatnych podporach. Tarcza stropu traktowana jest jako pozioma belka ściana obciążona w swojej płaszczyźnie siłami poziomymi i oparta na podatnych podporach, którymi są ściany budynku. Schematy tarcz stropu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schematy statyczne tarcz stropu na podatnych podporach (ścianach) przyjęte przy obliczaniu rozdziału obciążenia na poszczególne ściany: a) dla kierunku podłużnego; b) dla kierunku poprzecznego

Kierunek poprzeczny obciążono momentem, który jest iloczynem obciążenia zewnętrznego i jego mimośrodów względem środka ciężkości ścian. Sztywność ścian podatnych podópór $K = P/\delta$ obliczona dla fazy obciążeń eksploatacyjnych nieprzekraczających obciążenia wiatrem wynosi odpowiednio: $K_{1y} = 24610$; $K_{2y} = 18990$; $K_{3y} = 15240$; $K_{4y} = 30768$ kN/m; $K_{1x} = 934$; $K_{2x} = 6376$; $K_{3x} = 7514$; $K_{4x} = 10054$; $K_{5x} = 5001$ kN/m.

Obliczone deformacje zastępczej sztywnej belki odwzorowującej płytę stropu na podatnych tarczach ścian obciążonej siłami poziomymi (jak w badaniach doświadczalnych) porównano z wynikami przemieszczeń uzyskanymi w trakcie badań dla tego samego poziomu obciążeń, przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Porównanie deformacji dla przyjętego schematu statycznego uzyskanych z badań i analiz numerycznych

Wnioski

Na podstawie wyników badań, obliczeń i analiz stwierdzono, że:

1) przemieszczenia pomierzone w trakcie badań są znacznie mniejsze od granicznych w przypadku budynków określanych wg wymagań niemieckich jako $1/500 \cdot h$ (Eurocod 5 i Polskie Normy takich wymagań nie formułują);

2) odwzorowanie konstrukcji stropów za pomocą belki na podatnych podporach odzwierciedla z dużym przybliżeniem rzeczywistą pracę konstrukcji budynku; wg literatury bardziej dokładne są modele dwu- i trójwymiarowe;

3) przestrzenna konstrukcja budynku okazała się dość sztywna, również w przypadku wyższych poziomów obciążeń, co świadczy o dobrze skonstruowanych złączach i połączeniach.

Streszczenie

Budynki o konstrukcji szkieletu drewnianego ze współpracującym jedno- lub obustronnym poszyciem są coraz częściej technologią realizacji budownictwa mieszkaniowego w Polsce i krajach Europy Centralnej. Ta metoda wznoszenia budynków wdrożona wraz z nowymi technologiami wytwarzania elementów konstrukcji stwarza nowe możliwości rozwoju przemysłu budowlanego. Technologią zapewniającą jakość i zgodność z wymaganiami w zakresie wykonawstwa jest „Platform Framing” w odmiennej formie, w postaci wielkowymiarowych tarcz ściennych, stropowych i spordycznie dachowych zależnie od pomysłu architekta i formy pozwalającej na wykonawstwo konstrukcji dachu z wielkowymiarowymi elementami. Olbrzymią rolę w konstrukcji budynków odgrywają łączniki pomiędzy drewnianą konstrukcją i poszyciem oraz pomiędzy tarczami. Przenosząc oddziaływania z elementów konstrukcji mają decydujący wpływ na nośność i okształcenia budynku. Artykuł przedstawia wyniki badań eksperymentalnych i analiz obliczeniowych budynku szkieletowego ze współpracującym poszyciem, wykonanego w skali naturalnej. Przemieszczenia konstrukcji badano pod obciążeniem poziomym przyłożonym na wysokości stropu nad parterem. W rezultacie zadanego obciążenia uzyskano przestrzenny opis deformacji budynku, który porównano z okształceniami dopuszczalnymi w odpowiednich przepisach.

Słowa kluczowe: budownictwo szkieletowe, badania konstrukcji, sztywność przestrzenna

Abstract

Significant number of residential building in Poland and in Central Europe Countries is constructed in the wood framed with sheathing technology. This method of housing construction implemented with new technology of manufacturing creates progressive future for building industry. Solid wood is use in construction of the wall, floors and roof diaphragms (studs, floor joints, roof rafters and girders). Lateral stiffness of diaphragms is achieved applying plywood, chipboards or the other structural board of sheathing to the timber frame. Fasteners linking sheathing to the wooden frame and diaphragms interconnecting links redistribute loading in the structural elements, and they are affecting the lateral strength and displacements of building. The paper presents examples of construction, selected results of experimental tests and analytical modelling and

investigations of the wood-framed with sheathing buildings. Lateral displacements are investigated under concentrated load at the level of floor slab above the ground floor. The paper discusses results of experimental tests of the wood-framed sheathed building in natural scale. In result of applied horizontal loading the three-dimensional form of displacements has been obtained and then compared with allowable displacements for this kind of structure. The paper also presents analytical method of load sharing calculation on shear walls and their respective deformation under exploitation loading.

Literatura

- [1] Kasal B., Collins M.S., Paevere P., Foliente G.C.: Design models of light frame wood buildings under lateral load. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 130. No 8/2004.
- [2] Kappos A.J., Penelis G.G., Drakopoulos C.G.: Evaluation of simplified models for lateral load analysis of unreinforced masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 128. No 7/2002.
- [3] Malesza M., Miedziałowski Cz., Malesza J.: Badania doświadczalne konstrukcji nośnej szkieletowego budynku drewnianego. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. T. 3. Opole – Krynica. 2002.
- [4] Miedziałowski Cz., Malesza M.: Budynki o szkielecie drewnianym z poszyciem, Problemy mechaniki konstrukcji oraz zagadnienia kształtowania i realizacji. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. *Studia z zakresu inżynierii* Nr 55. Warszawa-Białystok. 2006.
- [5] Projekt autorski konstrukcji budynku o dachu czterospadowym (praca niepublikowana) 2006.
- [6] Phillips T.L., Itani R.Y., McLean D.I.: Lateral load sharing by diaphragms in wood – framed buildings. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 119. No 5. 1993.
- [7] Malesza M., Miedziałowski Cz., Malesza J.: Experimental tests of the wood-framed walls. *Inżynieria i Budownictwo*. No 4. 1999 (in polish).
- [8] Malesza M., Miedziałowski Cz.: Effect of duration of load on slip of connections and displacements of wall diaphragms in the wood-framed buildings. The 8th World Conference on Timber Engineering. WCTE 2004. 14 – 17 June 2004. Lahti. Finland.
- [9] Smith J., Foliente G.: Load and resistance factor design of timber joints. *International practice and future directions*. *Journal of Structural Engineering* Vol. 128 (1). 2002.
- [10] Marlor R.A., Bulleit W.M.: Load duration behaviour of wood connections. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 131 (9). 2005.
- [11] Miedziałowski Cz., Malesza M.: Budynki o szkielecie drewnianym z poszyciem. PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej IPPT. *Studia z zakresu inżynierii*. Nr 55. Warszawa-Białystok. 2006.
- [12] Patton-Mallory M., Pellicane P.J., Smith F.W.: Modelling bolted connections in wood; review. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 123 (8). 1997.



AGOCCEL - Power of Innovation

- znaczna redukcja wydatków na system zagęszczający
- produkty z tej grupy silnie zagęszczają, stabilizują oraz obniżają koszty produkcji (farby, tynki, kleje)



RETENMAIER POLSKA
SP. z o.o.

Al. Jerozolimskie 181
02-222 Warszawa

Tel. + 48 (22) 608 51 09

Fax + 48 (22) 608 51 51