

Rys. 7. Deski pomostowe z WPC Wood Polymer Composites [6]



Rys. 8. Śmiałe projekty na bazie technologii drewna klejonego warstwowo (budynki 20 i 32 kondygnacje) [7]

uporządkowanego, materiały budowlane „uporządkowane” i bardziej przewidywalne co do właściwości.

Dzięki kolejnym przeobrażeniom drewno z materiału słabo odpornego na korozję biologiczną staje się z jednej strony kompozytem polecanym w środowiskach narażonych na zawilgocenie, z drugiej strony ciekawym materiałem konstrukcyjnym dającym szansę budowania z niezwykłym rozmachem.

Przykładem niesamowitego rozmachu i najświeższym marzeniem architektów jest realizacja w Sztokholmie czterech 20-kondygnacyjnych apartamentowców o powierzchni 25 tysięcy m² oraz projekt 32-kondygnacyjnego energooszczędnego biurowca z materiałów powstałych na bazie drewna, który planowany jest na rok 2023 (rys. 8).

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN/B-03150:2000pl, Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie
 [2] PN-EN 13986:2006pl, Płyty drewnopochodne do stosowania w budownictwie. Właściwości, ocena zgodności i oznakowanie
 [3] PN-EN 14080:2013-07en, Konstrukcje drewniane – Drewno klejone warstwowo i drewno lite klejone warstwowo – Wymagania
 [4] PN-EN 14374:2005-09pl, Konstrukcje drewniane – Fornir klejony warstwowo (LVL) – Wymagania
 [5] Lindsay P., Eleanor T., Strengthening Construction Materials via Incorporation of Cellulose Nanocrystals: A Sustainable Biomaterial Pittsburgh 2012 – <http://136.142.82.187/eng12/Chair/pdf/4213.pdf>
 [6] Petschek P., Holzbau <http://technikseiten.hsr.ch>, 2010
 [7] Lanz K., Weiteres Holzbau-Großprojekt in Stockholm geplant Holzbau, Austria Fachmagazin für Holzbau und nachhaltige Architektur, nr 4/2015 – <http://www.holzbauaustria.at>

CLT – nowe możliwości dla budownictwa drewnianego

Dr inż. Dorota Kram, inż. Magdalena Stelmach, Politechnika Krakowska

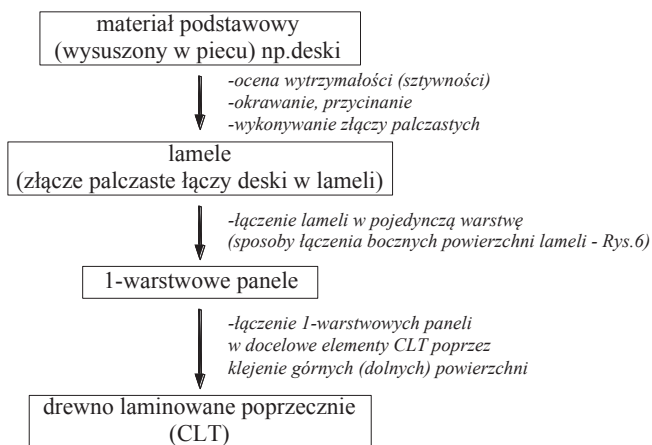
1. CLT – czym właściwie jest?

Skrót CLT (z ang.: Cross Laminated Timber) oznacza, w dosłownym tłumaczeniu na język polski, drewno klejone warstwowo poprzecznie (krzyżowo). Przez to pojęcie rozumie się materiał przeznaczony do produkcji elementów płytowych, tzw. płyt CLT. Płyta ta składa się z nieparzystej liczby warstw desek, zorientowanych wzajemnie prostopadle, przyklejonych jedna do drugiej (rys. 1, 3). Proces produkcji elementów CLT (rys. 2) otwiera pozyskanie surowych desek tartacznych, o odpowiedniej wilgotności, wytrzymałości i jakości wizualnej. Niektórzy producenci rozróżniają klasę jakości wizualną, charakteryzującą się odpowiednim doбором desek na powierzchnię zewnętrzną tak, aby gotowe elementy mogły być stosowane bez zakrywania ich warstwami



Rys. 1. Płyta CLT (3- i 5-warstwowa) [8]

wykończeniowymi oraz klasę konstrukcyjną. Gotowe deski łączone są złączami klinowymi w długie lamele o odpowiednio wyprofilowanych powierzchniach bocznych, w celu dalszego połączenia ich w pojedyncze warstwy. Na koniec, pojedyncze warstwy przyklejane

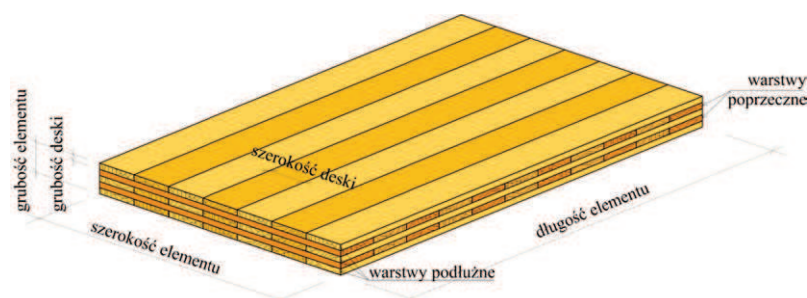


Rys. 2. Etapy procesu produkcji elementów z CLT [3]

są jedna do drugiej w układzie ortogonalnym, tworząc quasi-sztywne połączenie [1, 2]

Gotowe płyty CLT składają się z warstw podłużnych i poprzecznych. W elementach ściennych warstwy podłużne zorientowane są równoległe do działającej siły, z kolei w elementach stropowych i dachowych równoległe do rozpiętości przęsła. Na warstwy podłużne stosuje się przeważnie drewno wyższych klas (C24 i wyższe). Z kolei na warstwy poprzeczne – drewno klasy C16 i wyższe [1, 2].

Pojedyncze deski tworzące płyty CLT mają grubość od 10 do 50 mm i szerokość od 60 do 240 mm. Gotowe elementy płytowe osiągają szerokość od 0,6 do 5 m,



Rys. 3. Płyta CLT – charakterystyczne wymiary

długość do 18 m i grubość do 400 mm (poszczególne wymiary mogą różnić się w zależności od konkretnego producenta) [1].

2. Zakres zastosowania

Płyty CLT znajdują zastosowanie jako tarcze ścienne, płyty stropowe oraz płyty dachowe. W przypadku elementów ściennych włókna zewnętrznych warstw desek zorientowane są równoległe do działających sił pionowych, z kolei w płytach stropowych i dachowych – zgodnie z kierunkiem rozpiętości przęsła (głównego kierunku pracy) [1].

W polskojęzycznej literaturze technicznej z zakresu

budownictwa nie ma informacji na temat płyt z drewna klejonego warstwowo poprzecznie. Głównym źródłem informacji są tylko reklamowe strony internetowe producentów rozpoczynających realizację w Polsce projektów w zakresie konstrukcji z CLT. Podstawowe informacje na temat płyt CLT można znaleźć w literaturze anglojęzycznej [1, 3] i niemieckojęzycznej [4, 6]. Niestety do dziś sposoby podejścia do projektowania i wymiarowania konstrukcji z drewna klejonego warstwowo poprzecznie przedstawione są jedynie w publikacjach zagranicznych uczelni technicznych, w normach niemieckich oraz pre-normie prEN 16351:2012.

3. Podstawy projektowania

3.1. Właściwości mechaniczne i wymiarowanie

W tabeli 1 przytoczono wartości właściwości mechanicznych płyt CLT podawane przez producenta za Europejskimi Aprobatami Technicznymi. Warto zauważyć, że nie różnią się one od podanych w normie PN-EN-338 dla konstrukcyjnego drewna litego. Ze względu na specyfikę drewna klejonego w warstwach ortogonalnych konieczne jest poszerzenie danych o ścinanie „tarczowe” (po przyroście rocznym – ang. rolling shear) ($f_{r,k}$) wynikające ze ścinania między poszczególnymi warstwami (rys. 4). Drugim parametrem charakterystycznym materiału dla analizowanych płyt jest moduł odkształcenia postaciowego $G_{r,mean}$.

Zasady wymiarowania elementów z CLT są analogiczne jak w przypadku tradycyjnych konstrukcji drewnianych. Na etapie określania charakterystyk geometrycznych przekroju, a także w trakcie dalszego wymiarowania bardzo istotne jest uwzględnienie anizotropii drewna. Cechą odróżniającą CLT od drewna litego, jak i od drewna klejonego warstwowo GL (gdziekolwiek GLT), jest poprzeczny układ warstw. Anizotropia drewna sprawia, iż cecha ta jest niezwykle istotna, ponieważ wytrzymałość drewna i sztywność elementu są różne w zależności od kierunku ułożenia włókien (a więc zmieniają się na wysokości przekroju poprzecznego elementu).

Przy obliczaniu sztywności na zginanie można – w celu uproszczenia – nie uwzględniać udziału warstw poprzecznych. Dla drewna klejonego warstwowo poprzecznie charakterystyczny jest rozkład naprężeń normalnych i stycznych na wysokości przekroju (rys. 5). Rozkład naprężeń z kolei rzutuje na nieprzypadkową orientację



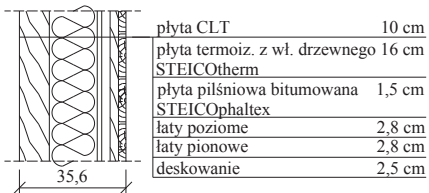
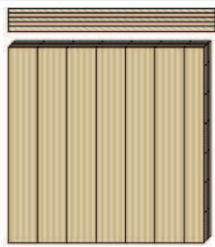
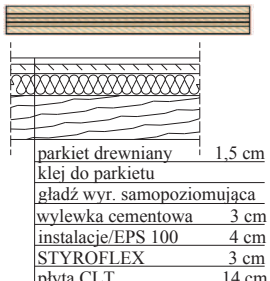
Rys. 4. Efekt przekroczenia wytrzymałości na ścinanie tarczowe (rolling shear) [7]

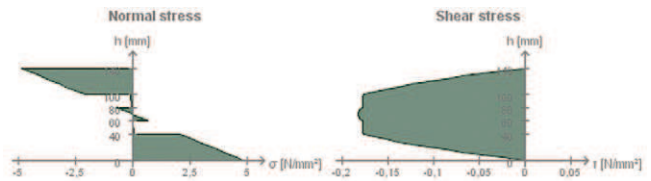
Tabela 1. Wartości charakterystyczne właściwości wytrzymałościowych i sprężystych elementów CLT (niem. BBS) oferowanego przez firmę Binderholz [6]

		Klasa wytrzymałości płyt	
		C16	C24
Wartości charakterystyczne wytrzymałości			
zginanie	$f_{m,k}$	12	18
rozciąganie	$f_{t,0,k}$	10	14
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4
ściskanie	$f_{c,0,k}$	17	21
	$f_{c,90,k}$	2,2	2,5
ściananie	$f_{v,k}$	1,8	2,5
ściananie tarczowe	$f_{t,k}$	0,7	
Właściwości sprężyste			
średni moduł sprężystości wzdłuż włókien	$E_{0,mean}$	8000	11000
średni moduł sprężystości w poprzek włókien	$E_{90,mean}$	270	370
średni moduł odkształcenia postaciowego	G_{mean}	500	690
średni moduł odkształcenia postaciowego przy ścinaniu tarczowym	$G_{r,mean}$	50	

włókien warstw zewnętrznych płyt zginanych i tarcz poddanych ścinaniu, jak również zwiększenie grubości warstw zewnętrznych elementów zginanych. Szczegółową procedurę wymiarowania elementów z CLT przedstawiono w pracach [1, 5, 7]. Rozważano tam tarczę ścienną oraz płytę stropową.

Tabela 2. Zalety drewna CLT [5]

Ilustracja	Analizowana cecha, komentarz
	<p>Bardzo dobra izolacyjność termiczna</p> <p>– w wyniku obliczeń otrzymano współczynnik przenikania ciepła U przegrody zewnętrznej o sumarycznej grubości 35,6cm na poziomie: $U = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$</p> <p><i>*ilustracja: przekrój przez projektowaną ścianę zewnętrzną [5]</i></p>
	<p>Stosunkowo wysoka ognioodporność</p> <p>– warstwa konstrukcyjna projektowanej ściany zewnętrznej o grubości 10 cm, przy jednostronnym działaniu pożaru, jest w stanie spełniać funkcje nośne przy maksymalnym czasie trwania pożaru równym 100 minut</p> <p>Zwiększona zdolność przenoszenia obciążeń w płaszczyźnie płyty</p> <p>– projektowana płyta ścienna: 5-warstwowa, o grubości każdej z warstw równej 20 mm (grubość całkowita: 10 cm) – maksymalne wyętnienie wymiarowanej płyty CLT: $\eta_{ny, v} = 41,7\%$ (ściananie w płaszczyźnie płyty)</p> <p><i>*ilustracja: projektowana płyta ścienna (widok z programu CLTdesigner)</i></p>
	<p>Zwiększona zdolność przenoszenia obciążeń prostopadle do płaszczyzny płyty</p> <p>5-warstwowa projektowana płyta stropowa: grubość każdej z warstw wewnętrznych: 20 mm, grubość każdej z warstw zewnętrznych: 40 mm (grubość całkowita: 14 cm)</p> <p>– maksymalne wyętnienie wymiarowanej płyty CLT: $\eta_M = 38,2\%$ (SGN: zginanie) $\eta_V = 39,6\%$ (SGN: ścinanie) $\eta_w = 70,5\%$ (SGU: ugięcia)</p> <p><i>*ilustracja: góra: projektowana płyta stropowa (widok z programu CLTdesigner) dół: przekrój przez projektowany strop nad parterem [5]</i></p>

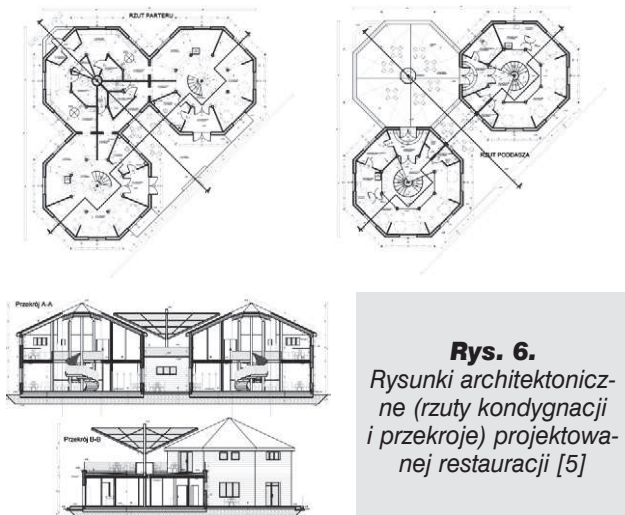


Rys. 5. Charakterystyczne dla CLT kształty rozkładów naprężeń normalnych (lewa strona) i stycznych (prawa strona) na wysokości elementu, widok z programu CLTdesigner [1]

3.2. Walory i cechy użytkowe

Główną ideą obróbki drewna, między innymi przy produkcji płyt CLT jest eliminacja niekorzystnych cech charakteryzujących przetwarzany materiał (jakim jest drewno) przy jednoczesnym maksymalnym wykorzystaniu jego atutów. I tak przy produkcji elementów z drewna klejonego warstwowo poprzecznie, otrzymany w wyniku obróbki materiał charakteryzują [3,4]:

- a) cechy związane z „masywnością” materiału:
 - bardzo dobra izolacyjność termiczna i akustyczna,
 - stosunkowo wysoka ognioodporność sięgająca nawet 120 minut (REI 120),
- b) cechy związane z prefabrykacją elementów produkowanych z drewna CLT:
 - łatwość i szybkie tempo wznoszenia konstrukcji,
 - czysta i sucha technologia wykonywania obiektów,
- c) cechy wynikające z wykorzystania drewna jako materiału do produkcji elementów:



Rys. 6.
Rysunki architektoniczne (rzuty kondygnacji i przekroje) projektowanej restauracji [5]

- lekkość konstrukcji (szczególnie istotna przy modernizacji i nadbudowach obiektów),
- znaczna pojemność cieplna i wilgotnościowa, zwiększające komfort użytkowania budynków,
- d) konsekwencje poprzecznego ułożenia warstw:
 - zmniejszone pęcznienie i skurcz drewna w płaszczyźnie płyty,
 - zwiększona zdolność przenoszenia obciążeń, zarówno w płaszczyźnie jak i prostopadle do płaszczyzny płyty,
 - stabilność wymiarowa elementów,
 - dowolność rozmieszczania otworów i całkowite rozdzielanie funkcji konstrukcyjnej i izolacyjnej (w porównaniu do szkieletowych technologii wznoszenia budynków z drewna).

Przykłady konkretnych aspektów projektowych zostały przedstawione w tabeli 2 na podstawie pracy [5]. W pracy tej dostrzeżono szereg zalet charakteryzujących analizowany materiał. Bogata forma architektoniczna zaprojektowanego budynku (rys. 6) świadczy o praktycznie całkowitej dowolności w kształtowaniu formy obiektów wykonanych w technologii CLT. Z kolei wyniki wymiarowania poszczególnych elementów konstrukcyjnych (niskie wyężenie materiału przy zastosowaniu niewielkich przekrojów elementów) wskazują na znaczny potencjał drewna klejonego warstwowo poprzecznie zarówno



Rys. 7. Przykłady nietypowych obiektów o konstrukcji z płyt z CLT, od lewej: turbiny wiatrowe (Niemcy), Snail Shell Tower (Austria), budynek Uniwersytetu Anglii Wschodniej (Wielka Brytania) [9]

w budownictwie niskim jak i przy projektowaniu obiektów wielokondygnacyjnych.

4. Podsumowanie

Drewno klejone warstwowo poprzecznie jako stosunkowo nowa koncepcja konstrukcyjna jest przedmiotem ciągłych badań mających na celu stworzenie jednolitych zasad obliczania i wymiarowania konstrukcji wykonanych w technologii CLT. Nie ulega jednak wątpliwości, że technologia ta ma wiele zalet, wśród których szczególnie podkreślić należy:

- wysoką izolacyjność termiczną i akustyczną,
 - czystą, prostą, suchą i szybką technologię wznoszenia obiektów na skutek prefabrykacji elementów,
 - znaczną pojemność cieplną i wilgotnościową, które zwiększają komfort użytkowania budynków,
 - wysoką zdolność do przenoszenia obciążeń zarówno w płaszczyźnie jak i prostopadle do płaszczyzny płyty.
- Powyższe cechy sprawiają, że technologia ta staje się poważnym konkurentem dla powszechnie stosowanych materiałów budowlanych.

Ze względu na wynikający z naturalności materiału wysoki komfort użytkowania budynków oczywistym docelowym obszarem zastosowania są budynki przeznaczone na stały bądź czasowy pobyt ludzi, a więc budynki mieszkalne, biurowe czy użyteczności publicznej. Ze względu na wysoką zdolność płyt do przenoszenia obciążeń, dodatkowym obszarem zastosowania stają się obiekty kubaturowe oraz przemysłowe.

Drewno klejone warstwowo poprzecznie (CLT) jest materiałem, który ma szansę zmienić dotychczasowe spojrzenie na samo drewno jak i na prefabrykację usprawniającą realizację obiektu. Z uwagi na omówione walory technologia ta znalazła już zastosowanie w wielu nietypowych obiektach budowlanych (rys. 7), pokazując spore jej możliwości.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CLT Handbook, FPIInnovation 2011
- [2] Augustin M., Podręcznik 1: Konstrukcje drewniane, Rozdział 6: Panele drewnopochodne, Projekty Pilotażowe Leonardo da Vinci 2008
- [3] Brandner R., Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report 2013
- [4] Świadczenie zgodności z normą EN 13501-2 Klasyfikacja ognio- wyrobów budowlanych i elementów budynków, wydanej przez Holzforschung Austria na czas październik 2011 do październik 2016 dla produktu CLT – <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2013/04/11.10.04-Klassifizierung-Wand-REI-120-kurz1.pdf>

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [5] Magdalena Stelmach Projekt architektoniczno-budowlany restauracji w technologii CLT – wybrane fragmenty Praca inżynierska, Politechnika Krakowska, Kraków 2014
- [6] http://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Services_Kontakt/Videos_Download/Pr%C3%BCfzeugnisse_Zulassungen/BBS_Englisch/BBS_European_Technical_Approval_ETI-06-0009.pdf
- [7] Design of CLT in Europe, Geir Glasø, Norsk Treteknisk Institutt http://www.cecobois.com/pdf/CLT/9-Design_of_CLT_in_Europe%28Glaso%29.pdf
- [8] <http://www.gandelligroup.com/strutture+in+xlam?lang=en>
- [9] <http://www.clt.info/en/projekte/>