

Daniel Pieniak¹⁾, Paweł Ogrodnik¹⁾, Paweł Kordos²⁾

DEGRADACJA KOMPOZYTU KONSTRUKCYJNEGO LVL W WARUNKACH JEDNOCZESNEGO ODDZIAŁYWANIA OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH I WYSOKICH TEMPERATUR

Streszczenie. Kompozyt na bazie klejonego drewna fornirowanego (LVL) są materiałami coraz częściej wykorzystywanymi w budownictwie. Kompozyt tego typu charakteryzuje się nieco innymi parametrami niż lite drewno, w szczególności istotna jest ich wytrzymałość i charakter anizotropii tych właściwości. W przypadku większości materiałów konstrukcyjnych oddziaływanie temperatur w warunkach pożaru ma wpływ na ich degradację, przejawiającą się utratą wytrzymałości. Celem prezentowanych w artykule badań była ocena wpływu temperatur środowiska pożaru na degradację właściwości wytrzymałościowych kompozytu LVL. Wykazano, że degradacja wytrzymałość na ściskanie kompozytu LVL postępuje systematycznie w kolejnych przedziałach temperatury.

Słowa kluczowe: drewno klejone warstwowo z fornirow (LVL), temperatury pożarowe, wytrzymałość na ściskanie, degradacja.

WSTĘP

Kompozyty oparte na drewnie są relatywnie nowymi materiałami konstrukcyjnymi wykorzystywanymi w budownictwie. Do grupy tych materiałów należą kompozyty o strukturze laminatu m.in. drewno fornirowane warstwowo (LVL – Laminated Veneer Lumber). Kompozyty tego typu obecnie wykorzystywane są na wiele sposobów n.p.: jako belki stropowe, w konstrukcji okien i drzwi [Ozcifci 2007]. Dzięki konstrukcji warstwowej kompozytu, elementy konstrukcyjne oparte na LVL charakteryzują się dużą sztywnością, dobrą odpornością ogniową oraz estetycznym wyglądem. Elementy tego typu dzięki jednorodności posiadają znakomitą stabilność wymiarów, a obecnie są dostępne w szerokim zakresie wymiarowym [Ozcifci 2008]. Żywice adhezyjne łączące warstwy drewna, istotnie wpływają na właściwości kompozytu, zmniejszając adsorpcję wilgoci, ograniczając wpływ środowiska kwaśnego, wpływają także na mniejszą masę własną [Johansson 1995]. Do wykonania fornirow klejonych stosuje się najczęściej kleje fenolowo-formoaldehydowe, natomiast do łączenia fornirow zewnętrznych oraz na długości mogą być także stosowane kleje melaminowe [Mehrab 2004, Uysal

¹⁾ Katedra Techniki Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa.

²⁾ Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

2005]. W kompozytach LVL stosuje się warstwy forniru o grubości ok. 3–4 mm (najczęściej 3,2 mm), który jest skrawany obwodowo [Chui 1994].

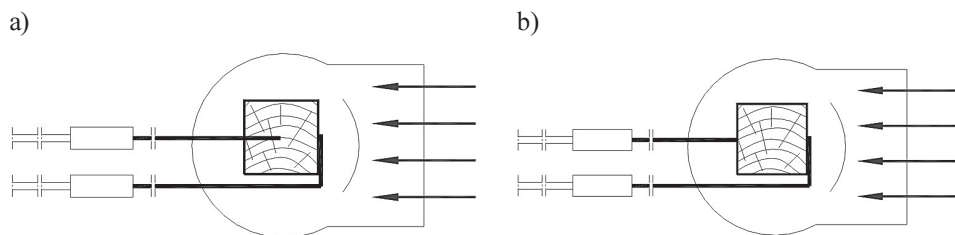
Parametry fizyko-mechaniczne kompozytu LVL zależne są w dużym stopniu od gatunku drzew z którego wykonuje się materiał, typu kleju oraz grubości poszczególnych warstw [Baldwin 1995, Kamala 1999]. Jakość drewna wykorzystywanego do produkcji kompozytu oraz gatunek forniru mają także duże znaczenie [Tichy 1978], w dosyć dawno przeprowadzonych badaniach wytrzymałości kompozytów LVL [Strickler 1971] wykazano, o kilka procent wyższą wytrzymałość kompozytu LVL wykonanego z forniru pierwszo gatunkowego w porównaniu do drugo i trzecio gatunkowego. Istotne znaczenie dla wytrzymałości ma również ilość sęków oraz ich rozmieszczenie w strukturze materiału [Wolf 1979] oraz zgodność kierunku włókien z kierunkiem wektora wymuszenia [Sei-Chang Oh 2010].

Temat wpływu parametrów środowiska na wytrzymałość kompozytu LVL był już podejmowany, badano m.in. wpływ oddziaływania pary wodnej o różnych temperaturach i wilgotności podczas modyfikacji termicznej [Colak 2007], jednakże większość tych badań była ukierunkowana na ocenę sposobu produkcji kompozytu. Podejmowano również badania wpływu technologii montażu elementów z kompozytu LVL na ich wytrzymałość [Celebi 2007]. W znanych autorom publikacjach nie podjęto badań wpływu oddziaływania temperatur pożarowych na wytrzymałość kompozytu LVL. Ponadto, wykonywane dotychczas przez autorów próby na typowych stanowiskach wytrzymałościowych z wstępnym nagrzeniem próbek w piecu a następnie z przeniesieniem na stanowisko badawcze powodowały duże rozrzuty wyników badań. W związku z tym w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie zaprojektowane i zbudowano specjalne stanowisko do badań wytrzymałościowych z możliwością jednoczesnego ogrzewania próbek bezpośrednio na stanowisku oraz realizacji obciążenia statycznego.

MATERIAŁ I METODA

Próbki do badań zostały wykonane zgodnie PN-72/C-04907. Materiał do wykonania próbek został zakupiony u producentów fornirowego drewna warstwowego LVL. Przygotowane próbki były leżakowane w temperaturze 20 °C a ich wilgotność w czasie badań wynosiła $W = 8\%$.

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej FPZ 100/1 (VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein, Germany), która umożliwia obciążenie siłą statyczną oraz utrzymania jej w układzie pionowym na stałym założonym poziomie. Maksymalna wytwarzana przez maszynę siła statyczna wynosi 100kN. Maszyna posiada cztery zakresy prędkości przesuwu tlawersy. W czasie badań użyty został zakres prędkości przesuwu tlawersy I/III, który pozwala na przesuw tlawersy z prędkością 0,021–0,84 mm/min.



Rys. 1. a) Schemat układu podczas badań wstępnych celem określenia czasu nagrzania próbki; b) Schemat układu termoelementów w czasie badań podstawowych

Przed rozpoczęciem badań podstawowych przeprowadzono badania wstępne, których celem było ustalenie zakresów temperatur eksperymentu oraz określenie czasów wygrzewania próbek do wyrównania temperatury w całej objętości próbki. W badaniach wstępnych w próbkach wykonywano otwór, w którym umieszczano termoparę, celem dokonania pomiaru temperatury w geometrycznym środku próbki (rys. 1a). Czas nagrzewania określono jako czas, po którym termoparą umieszczoną wewnątrz próbki zmierzono temperaturę przyjętą w planie badań.

Jako wyjściową przyjęto temperaturę otoczenia równą 20 °C. Temperaturę graniczną określono na poziomie 230 °C, jest to temperatura bliska temperaturze zapłonu powierzchni drewna. Istotną temperaturą badań była także temperatura 100 °C – przy tej temperaturze następuje odparowanie wody. Dodatkowo badania przeprowadzone dla następujących zakresów temperatury: 50 °C, 100 °C oraz 150 °C.

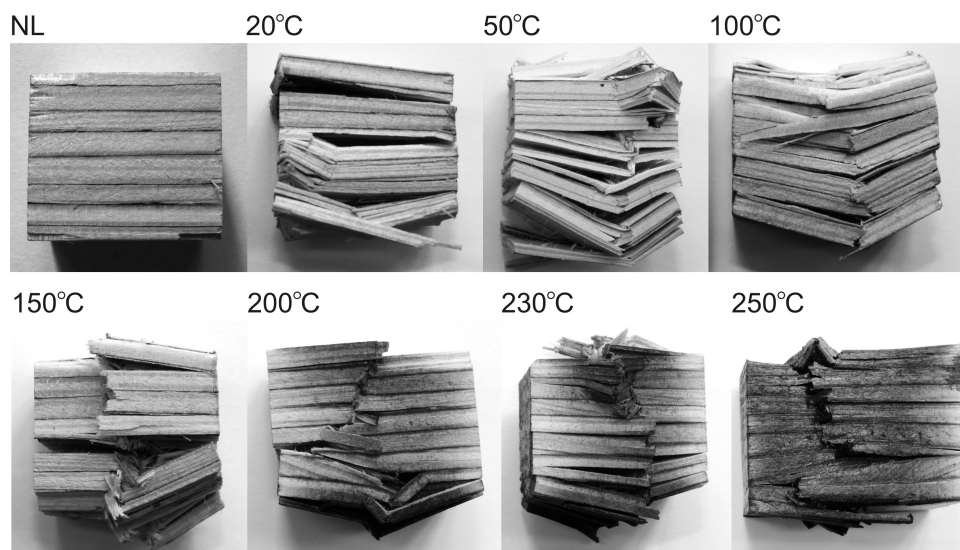
W badaniach podstawowych prowadzono pomiary temperatur na powierzchni próbki za pomocą dwóch termopar rozmieszczonych stycznie do powierzchni bocznych próbki (rys. 1b). Obciążenie próbki następowało po osiągnięciu założonej temperatury i utrzymaniu jej przez czas ustalony podczas badań wstępnych. W czasie rzeczywistym rejestrowano wartości sił niszczących oraz temperaturę.

Wzrost temperatury w komorze podczas badania uzyskano poprzez zastosowanie urządzenia umożliwiającego nawiew gorącego powietrza (GHG 650 LCE, Bosch, Germany). Zakres temperatur uzyskiwanych u wylotu dyszy wynosił 50–560 °C, a strumień gorącego powietrza można było regulować w zakresie 250–500 l/min.

WYNIKI BADAŃ

Sposób degradacji próbek

Sposób degradacji próbek poddanych jednoczesnemu obciążeniu statycznemu i obróbce termicznej był odmienny w kolejnych zakresach temperaturowych. Fotografie próbek po realizacji próby przedstawiono na rysunku 2, w kolejności od próbki nie poddanej obciążeniu do próbki poddanej obciążeniu w temperaturze 250 °C.



Rys. 2. Próbkę z kompozytu LVL poddane obciążeniom statycznym i obróbce cieplnej

Wytrzymałość na ściskanie

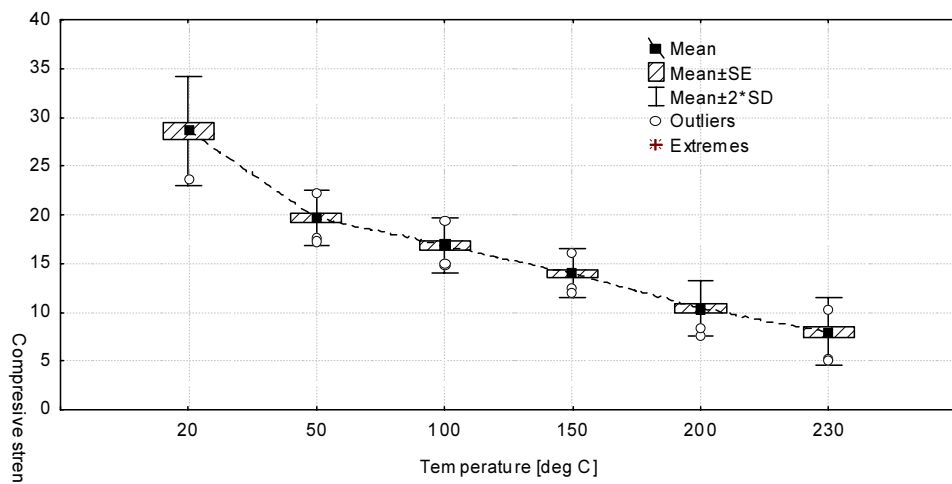
Badanie przeprowadzono na 66 próbkach przedstawionych na rysunku 2, po 11 próbek w każdym przedziale temperatury. Parametry statystyczne uzyskanych wyników badań przedstawiono w tabeli 1.

Graficzne miary zmienności rozkładu statystycznego wyników pomiarów wytrzymałości na ściskanie w kolejnych przedziałach temperatury, ich poziomy i rozrzut statystyczny przedstawiono na wykresie ramkowym (rys. 3).

Ze względu na wysoki poziom rozrzutu uzyskanych wyników przeprowadzono test „post hoc” umożliwiającą ocenę różnic między wynikami z kolejnych zakresów

Tabela 1. Statystyki opisowe wyników badań wytrzymałości na ściskanie

Temperatura [°C]	Wartość N	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]					Odchylenie std. [%]
		średnia	mediana	minimum	maksimum	odchylenie std.	
20	11	28,66364	29,80000	23,80000	32,00000	2,793662	9,746362
50	11	19,67273	19,80000	17,20000	22,20000	1,437422	7,306673
100	11	16,87273	17,20000	14,80000	19,30000	1,440896	8,539792
150	11	13,96364	14,20000	11,90000	16,20000	1,265127	9,060152
200	11	10,38182	10,80000	7,60000	11,80000	1,418322	13,66159
230	11	7,95455	8,40000	5,00000	10,20000	1,733992	21,79874



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu LVL w warunkach podwyższonych temperatur

obciążenia. Test Scheffe jest testem opartym na analizie kontrastów w badanych grupach, zapewnia on łączny poziom istotności ($\alpha = 0,05$) dla wszystkich porównań. Test ten charakteryzuje się również małym błędem pierwszego rodzaju polegającym na odrzuceniu hipotezy zerowej zakładającej, że obserwowane różnice w wytrzymałości są przypadkowe, która w rzeczywistości jest prawdziwa. Wyniki testu Scheffe przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki testu „post hoc” Scheffe

Temperatura [°C]	{1} M = 28,664	{2} M = 19,673	{3} M = 16,873	{4} M = 13,964	{5} M = 10,382	{6} M = 7,9545
20 {1}		0	0	0	0	0
50 {2}	0		0,024969	0	0	0
100 {3}	0	0,024969		0,017288	0	0
150 {4}	0	0	0,017288		0,001366	0
200 {5}	0	0	0	0,001366		0,078466
230 {6}	0	0	0	0	0,078466	

Degradacja

Przeprowadzono analizę poziomu uszkodzenia – degradacji wytrzymałości D kompozytu LVL w kolejnych zakresach temperatury. Degradację kompozytu określono wykorzystując równanie (1) pozwalające określić procentowo poziom degradacji w przyjętym zakresie obciążenia.

$$D = 1 - \frac{C}{C^*} \quad (1)$$

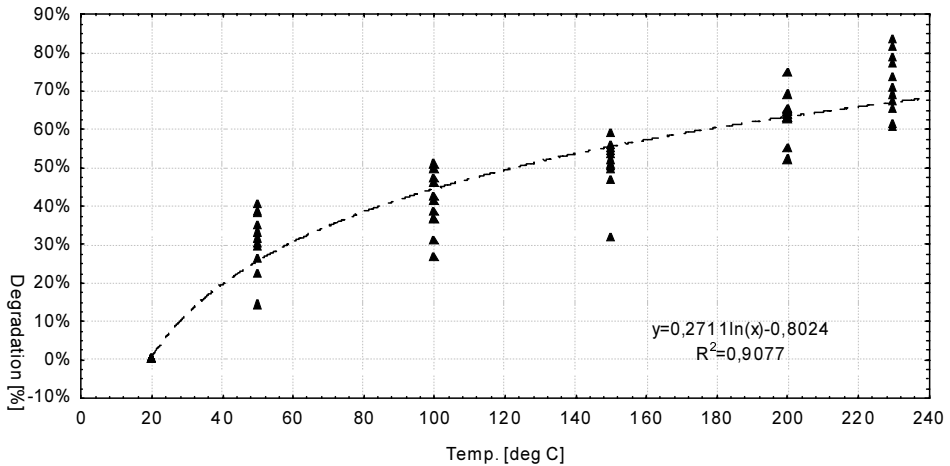
Gdzie:

D – poziom degradacji [%],

C – wytrzymałość na ściskanie w kolejnych zakresach temperatury [MPa],

C^* – wytrzymałość na ściskanie w temperaturze 20 °C [MPa].

Przebiegi funkcji degradacji wytrzymałości przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przebiegi funkcji degradacji wytrzymałości kompozytu LVL w warunkach wysokich temperatur

DYSKUSJA

W przeprowadzonych badaniach wykazano spadek wytrzymałości na ściskanie kompozytu LVL w wyniku oddziaływań temperatur pożarowych. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie w kolejnych zakresach temperaturowych były niższe o kilka megapaskali. Fluktuacje wyników wytrzymałości narastały w kolejnych zakresach temperatury, wartości odchyłek standardowych wynosiły odpowiednio 9,74% w temp. 20 °C oraz 21,79% w temp. 230 °C, a więc obserwowano ponad dwukrotny ich wzrost, co może wskazywać na zwiększenie się anizotropii kompozytu w wysokich temperaturach oraz bardziej kruchy charakter zniszczenie próbki, który ze swojej natury wpływa na zwiększenie rozrzutu wyników wytrzymałości. W ostatnim zakresie temperatury eksperymentu (230 °C) minimalna wartość wytrzymałości jest o połowę mniejsza od wartości maksymalnej. Skokowy wzrost odchylenia standardowego wyników wytrzymałości na ściskanie obserwowano po przekroczeniu zakresu temperatury

150 °C. Prawdopodobnie ma na to wpływ odparowanie wody ze struktury kompozytu, które również powoduje wzrost kruchości. Krucho charakter zniszczenia potwierdzają również obserwacje próbek poddanych obciążeniu (rys. 2). W niższych temperaturach degradacja postępuje na dwa sposoby, prawdopodobnie w pierwszym etapie poprzez zniszczenie połączenia adhezyjnego poszczególnych warstw kompozytu tzn. absorbcję energii wymuszenia w tych strefach a następnie w drugim etapie poprzez odkształcenie plastyczne oraz złamanie niektórych warstw drewna. W temperaturach podwyższonych, w szczególności w zakresach powyżej 100 °C degradacja ma odmienny charakter. Peknięcie propaguje prostopadle poprzez kolejne warstwy kompozytu zachowując kierunek zgodny z kierunkiem wymuszenia, nie obserwuje się odklejania się poszczególnych warstw kompozytu od siebie.

Wyniki testu Scheffe wskazują na istotne statystycznie ($p < 0,05$) różnice pomiędzy wynikami z kolejnych zakresów temperaturowych. Jedynie w przypadku wyników z przedziałów 200 °C i 230 °C nie wykazano istotnych statystycznie różnic dla założonego poziomu prawdopodobieństwa błędu dorzucenia hipotezy zerowej o braku różnic na poziomie mniejszym niż 5% ($\alpha = 0,05$). Jednakże wyniki testu Scheffe wskazują na różnice a uzyskane wartości prawdopodobieństwa są wynikiem zwężenia przedziału temperatury z 50 °C do 30 °C.

Obliczony procentowy poziom degradacji w kolejnych zakresach temperatury wzrasta. W ostatnim przedziale temperatury poziom degradacji wytrzymałości wynosi prawie 70% dla przyjętego logarytmicznego modelu rozkładu degradacji o najlepszym dopasowaniu do danych empirycznych ($R^2 = 0,9077$). Charakterystyczne poziomy degradacji 10% i 50% obserwowane są po przekroczeniu temperatur odpowiednio 30 °C i 120 °C.

Badania potwierdziły przydatność stanowiska opracowanego w Zakładzie Mechaniki Stosowanej SGSP do badań porównawczych wytrzymałości materiałów drewnopochodnych w symulowanych warunkach temperatur pożarowych.

LITERATURA

1. Baldwin R.F.: Plywood and veneer-based products, manufacturing practices (Wood technology books ser). Miller Freeman. San Francisco 1995.
2. Celebi G., Kilic M.: Nail and screw withdrawal strength of laminated veneer lumber made up hardwood and softwood layers. *Construction and Building Materials*, 21, 2007: 894–900.
3. Chui Y., Schneider M., Hang H.: Effects of resin impregnation and process parametre on some properties of poplar LVL. *Forest Products Journal*, 44, 1994: 74–78.
4. Colak S., Colakoglu G., Aydin I.: Effects of logs steaming, veneer drying and aging on mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). *Building and Environment*, 42, 2007: 93–98.
5. Johansson C.J.: Glued-in bolts. Timber engineering. STEP 1: lecture C14. Centrum Hout. Almere 1995.

6. Kamala B.S., Kumar P., Rao R.V., Sharma S.N.: Performance test of laminated veneer lumber (LVL) from rubber wood for different physical and mechanical properties. *Holz Roh Werkst*, 1999: 114–116.
7. Madhoushi M., Martin P. Ansell.: Experimental study of static and fatigue strengths of pultruded GFRP rods bonded into LVL and glulam. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24, 2004: 319–325.
8. Ozcifci A.: Effects of scarf joints on bending strength and modulus of elasticity to laminated veneer lumber (LVL). *Building and Environment*, 42, 2007: 1510–1514.
9. Ozcifci A., Okcu O.: Impacts of some chemicals on combustion properties of impregnated laminated veneer lumber (LVL). *Journal of materials processing technology*, 199, 2008: 1–9.
10. Sei-Chang O.: Applying failure criteria to the strength evaluation of 3-ply laminated veneer lumber according to grain direction by uniaxial tension test. *Construction and Building Materials*, 2010.
11. Strickler M.D., Pellerin R.F.: Tension proof loading laminated beams. *Forest Products Journal*, 21, 1971: 10–15.
12. Tichy R.J, Bodig G.J.: Flexural properties of glued la pine dimension lumber. *Forest Products Journal*, 29, 1978.
13. Uysal B.: Bonding strength and dimensional stability of laminated veneer lumbers manufactured by using different adhesives after the steam test. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25, 2005: 395–403.
14. Wolf R., Moddy R.C.: Bending strength of vertically glued laminated beams. *Forest Products Journal*, 30, 1979: 32–40.

DEGRADATION OF LVL COMPOSITE MATERIAL IN THE CONDITIONS OF SIMULTANEOUS IMPACT OF STATIC LOADS AND HIGH TEMPERATURES

Abstract

Composites based on laminated veneer lumber (LVL) are more and more commonly used in the building industry. Such composites have a slightly different characteristics compared to a solid wood, particularly with regards to their strength and anisotropy of the properties. In case of majority of construction materials, temperatures impact in the conditions of fire results in degradation process, manifested by the loss of strength. The objective of studies presented in this paper, was the evaluation of fire temperatures impact on the degradation of strength properties of LVL composite. It has been demonstrated that degradation of the compression strength of LVL composite proceeds successively in the subsequent temperature ranges.

Key words: Laminated veneer lumber (LVL), fire temperatures, compression strength, degradation.