

PAWEŁ KOSSAKOWSKI

Kielce University of Technology
Faculty of Civil and Environmental Engineering
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland
e-mail: kossak@tu.kielce.pl

LOAD-BEARING CAPACITY OF WOODEN BEAMS REINFORCED WITH COMPOSITE SHEETS

Abstract

The paper presents preliminary data on load-bearing capacity of wooden beams reinforced with composite sheets subjected to static bending. The tensile part of beams was reinforced with composite sheets from S&P Clever Reinforcement AG. Glass sheet S&P G-Sheet AR 50/50, aramid sheet S&P A-Sheet 120/290 and carbon sheet S&P C-Sheet 240/400 were used. Basing on the tests results it can be concluded that the load-bearing capacity rose in the range 20-48% due to the application of one-layer reinforcement. The obtained results are promising and indicate future research possibilities especially with the use of carbon sheets.

Keywords: wood, wooden beams reinforcement, composites, composite sheet

1. Introduction

Over the years composites have become basic materials used in construction engineering to strengthen elements. They are most widely applied to reinforce concrete and reinforced concrete structures, while less masonry and wood structures. Composites are also used to reinforce construction elements from other materials, including wood and wood-like materials.

Wood is reinforced mainly with composite laminates. Fewer cases deal with sheets. Due to a small number of studies on wood reinforcement with composite

sheets, this issue is still being investigated in Poland and abroad, eg. [1, 2].

The paper presents the problem of wooden beams reinforced with composite sheets. The preliminary strength test results have been presented aimed at determining a degree of reinforcement with glass, aramid and carbon fibers.

2. Strength test of beams reinforced with composite sheets

The strength tests covered static bending of wooden beams without reinforcement and reinforced with

Table 1. Parameters of the composite sheet with glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50 [6]

Elastic modulus [kN/mm ²]	65
Tensile strength (virgin filament) [N/mm ²]	3000
Sheet weight (total 350 g/m ²) [g/m ²]	175 in both directions
Density [g/cm ³]	2.68
Elongation at rupture [%]	4.3
Design thickness (fibre weight/density) [mm]	0.065
Theoretical design cross-section 1000 mm width [mm ²]	65 (fibre area only/each direction)
Reduction factor for design (manual lamination / UD sheet)	1.4 (recommended by S&P)
Tensile force of 1000 mm width for design [kN]	(65 × 3000)/1.4 = 139.3 each direction
Application:	<ul style="list-style-type: none"> – Explosion protection – Reinforcing of masonry or historic buildings – Seismic retrofitting

Table 2. Parameters of the composite sheet with aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 [4]

Elastic modulus [kN/mm ²]	120
Tensile strength [N/mm ²]	2900
Fibre weight (main direction) [g/m ²]	290
Weight per unit area of sheet [g/m ²]	320
Density [g/cm ³]	1.45
Elongation at rupture [%]	2.5
Design thickness (fibre weight/density) [mm]	0.20
Theoretical design cross-section 1000 mm width [mm ²]	200
Reduction factor for design (manual lamination / UD sheet)	1.3 (recommended by S&P)
Tensile force of 1000 mm width for design [kN]	(200 × 2900)/1.3 = 446.2
Application:	– Impact protection – Explosion protection

Table 3. Parameters of the composite sheet with carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 [5]

Elastic modulus [kN/mm ²]	240
Tensile strength [N/mm ²]	3800
Fibre weight (main direction) [g/m ²]	400
Weight per unit area of sheet [g/m ²]	430
Density [g/cm ³]	1.7
Elongation at rupture [%]	1.55
Design thickness (fibre weight/density) [mm]	0.234
Theoretical design cross-section 1000 mm width [mm ²]	234
Reduction factor for design (manual lamination / UD sheet)	1.2 (recommended by S&P)
Tensile force of 1000 mm width for design [kN]	(234 × 3800)/1.2 = 744.0
Application:	– Flexural enhancement (low quality of substrate) – Axial load enhancement of columns – Replacement of stirrups in columns

composite sheets by S&P Clever Reinforcement Company AG. Three types of sheets have been used with fibers:

- glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50 of elastic modulus $E = 65$ GPa,
- aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 of elastic modulus $E = 120$ GPa,
- carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 of elastic modulus $E = 240$ GPa.

The technical parameters of the sheets have been given in Tables 1-3.

Figure 1 presents the investigated beams reinforced with one-layer sheets from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50, aramid fibers A-Sheet 120/290 and carbon fibers S&P C-Sheet 240/400.

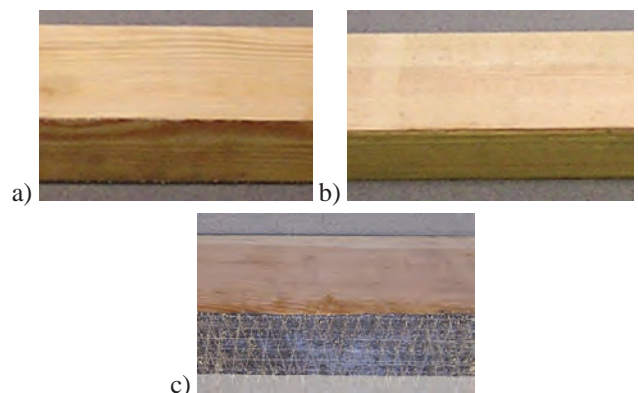


Fig. 1. View of one – layer reinforcement of wooden beams with sheets from: (a) glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50; (b) aramid fibers S&P A-Sheet 120/290; (c) carbon fibers S&P C-Sheet 240/400

The tests have been initiated with the view to analyse beams reinforced with one – layer sheets. However, due to better properties of carbon fiber sheets as well as their high strength parameters, two – layer reinforcement of this sheets has also been considered. The nominal dimensions of the beams were $b \times h \times L = 6 \times 8 \times 144$ cm. The four point bending scheme has been adopted as shown in Figure 2. During the measurements the force F and deflection w in the center of the beams were recorded.

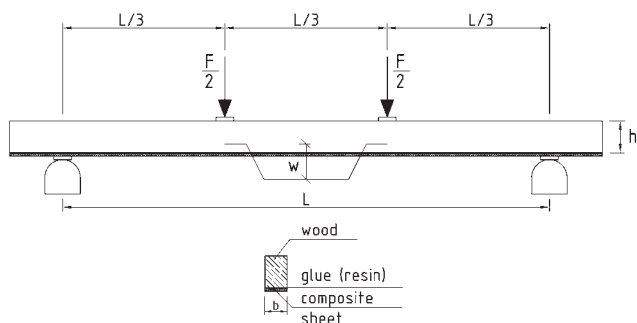


Fig. 2. Scheme of the static bending of wooden beams reinforced with composite sheets

Figure 3 presents the testing stand, on which static bending of the beams was realised.

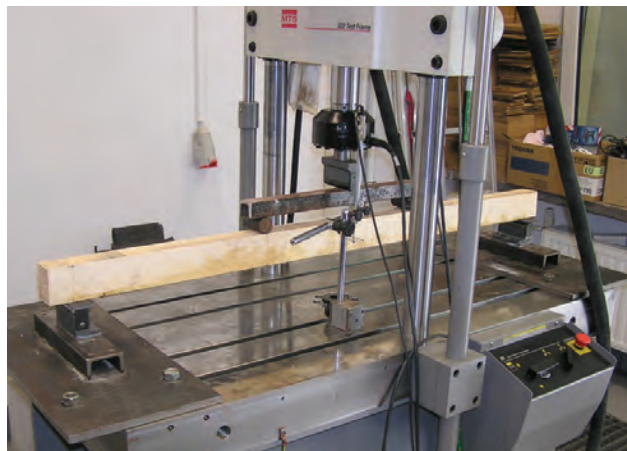


Fig. 3. Testing stand

In the first experimental stage the elastic parameters of wood were determined according to [3]. For $n = 10$ beams the mean of the elastic modulus along the material fibers was $EL = 9030 \pm 425.6$ MPa at standard deviation of $s = 686.7$ MPa and the confidence level 95%.

The bending strength was taken as the parameter determining the strength of wood, according to [3]. The mean value was $f_m = 46.9$ MPa for the failure stress from 34.3 to 56.6 MPa. Due to a significant scatter of the results obtained, which is typical for wood, in the next tests the same elements were analysed before and

after reinforcement. Thanks to that, the comparison of the values was made for the same material and the impact of the non-uniformity of wood on the results was reduced.

In the next stage the load-bearing capacity of beams reinforced with composite sheets was determined. The load-bearing capacity was defined as the maximum force F_{max} in given experiment, according to the scheme shown in Figure 2.

Next, load-bearing capacity of beams of dimensions $b \times h \times L = 6 \times 3.8 \times 68.4$ cm cut out from reinforced beams, was tested. Load-bearing capacity of beams of dimensions $b \times h \times L = 6 \times 3.8 \times 68.4$ cm was calculated into that those of beams of dimensions $b \times h \times L = 6 \times 8 \times 144$ cm so that the results could be a reference source for the reinforced beams. Consequently, load-bearing capacity of the reinforced beams could be referred to the same elements and the same wood before and after reinforcement.

3. Test results of selected beams reinforced with composite sheets

3.1. Beams without reinforcement

Destruction of the wooden beams without reinforcement occurred at the bottom of the central part (Fig. 4) due to the maximum bending moment, leading to exceeding the tensile strength of the wood at bottom fibers.



Fig. 4. Destruction of the wooden beam without reinforcement, a) the whole element, b) closer view

Analysing the graph of force – deflection $F(w)$ shown in Figure 5, it needs to be noted that the decrease of the beam's stiffness occurred quite soon – in the middle of the test. The destruction of the material took place in stages. After the maximum force was achieved, an abrupt decrease in strength and material's strengthening occurred until complete destruction.

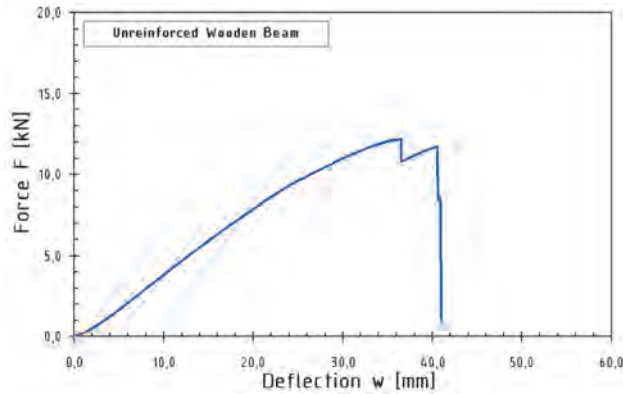


Fig. 5. The graph of force – deflection $F(w)$ of the wooden beam without reinforcement

3.2. Beams reinforced with sheets from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50

In the case of beams reinforced with sheets from glass fibers S&P G-Sheet AR50/50 the destruction covered both the structure of wood and the composite reinforcement at the bottom of the central part. No destruction of the composite sheets was recorded at the support zones. The destruction of the composite sheets and the wood occurred at the final stage of beams' operation due to the loss of strength of the composite fibers.



Fig. 6. View of the destroyed beam reinforced with composite sheet from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50 (one – layer reinforcement), a) the whole element, b) closer view

The transition of the beams reinforced with sheets from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50 into a non – linear range occurred quite early – for ca. 0.4 of the maximum deflection. In the next stage flattening of the graph of force – deflection $F(w)$ was observed until destruction, which took place abruptly. It can be seen in Figure 7.

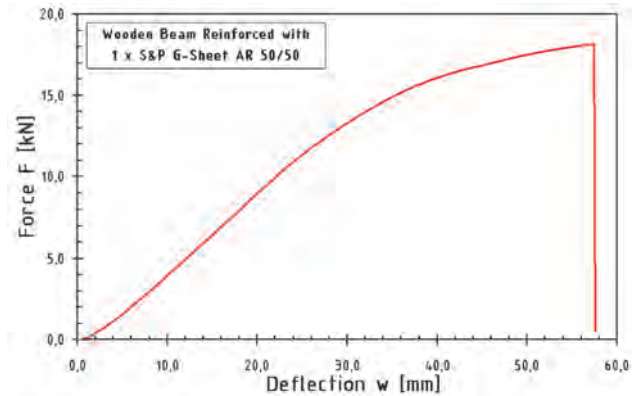


Fig. 7. The graph of force – deflection $F(w)$ of the wooden beam reinforced with the composite sheet from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50 (one – layer reinforcement)

3.3. Beams reinforced with sheets from aramid fibers S&P A-Sheet 120/290

One of the beams reinforced with sheets from aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 was destroyed both in the central part (where the wood structure broke) and at the support zones. In the latter case the wood was sheared just above the reinforcement. The strength of wood was a decisive factor behind the loss of load-bearing capacity, while the destruction of the sheet from aramid fibers was insignificant. The structural non – uniformity was also the cause of the destruction. In the case of other locations of the defects in the material a typical destruction patterns were observed.



Fig. 8. View of the destroyed beam reinforced with composite sheet from aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 (one – layer reinforcement), a) the whole element, b) closer view

In the analysed case the destruction occurred in stages, which can be easily noticed in Figure 9. The decrease in stiffness, indicating the transition of the material into the non – linear range took place very early at ca. 0.30 of the maximum deflection. Next, the decrease of the force was observed and destruction, which occurred in several stages covering wood structure and displacement of the reinforcement sheet.

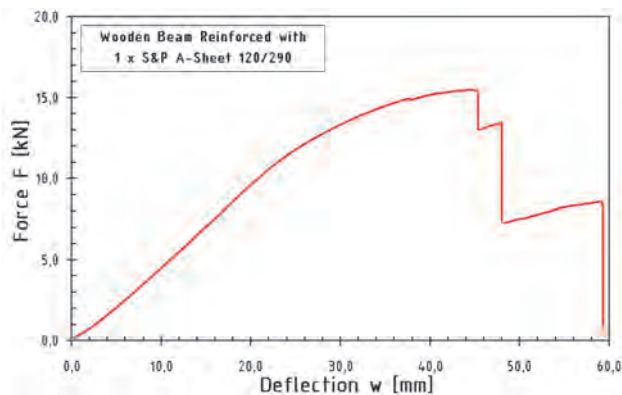


Fig. 9. The graph of force – deflection $F(w)$ of the wooden beam reinforced with the composite sheet from aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 (one – layer reinforcement)

3.4. Beams reinforced with sheets from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400

Similarly to the beams reinforced with sheets from glass fibers, in the case of the application of carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 the destruction covered the wood structure and the composite reinforcement at the bottom of the central part without the destruction of the sheet at support zones.



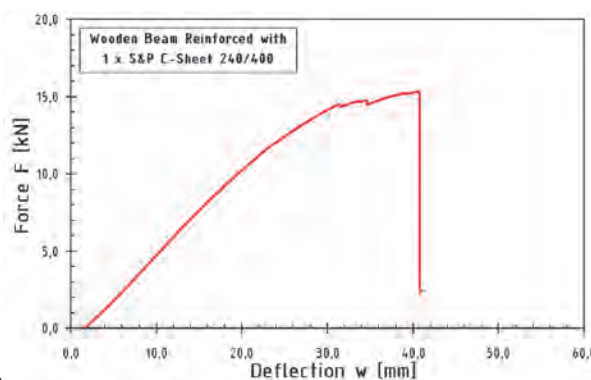
Fig. 10. View of the destroyed beam reinforced with composite sheet from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 (one – layer reinforcement), a) the whole element, b) closer view



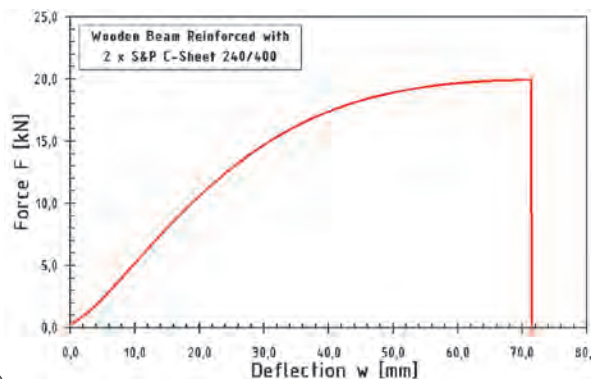
Fig. 11. View of the destroyed beam reinforced with composite sheet from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 (two – layer reinforcement), a) the whole element, b) closer view

The destruction of the beams occurred at the final stage due to the loss of strength of the composite fibers. The described way of destruction was observed both for the one – layer and two – layer reinforcement (Fig. 10 and 11).

The graphs of force – deflection $F(w)$ of the beams reinforced with sheets from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 were also similar to those obtained for beams reinforced with sheets from glass fibers. In the case of the application of a single layer of reinforcement the transition of the material into the non – linear range occurred at ca. 0.5 of the maximal deflection (Fig. 12a). In the case of the application of a two – layer reinforcement it took place earlier at 0.3 of the maximum deflection, whose value was significantly higher (Fig. 12b) in comparison to the deflections recorded for the other beams reinforced with composite sheets.



a)



b)

Fig. 12. The graphs of force – deflection $F(w)$ of the wooden beams reinforced with the composite sheet from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400, a) one – layer reinforcement, b) two – layer reinforcement

In the case of a one – layer reinforcement the destruction occurred in stages with force decreasing at the end of the test (Fig. 12a). For the reinforcement with two – layer sheet from carbon fibers the flattening of the graph force – deflection $F(w)$ was observed until destruction, which took place abruptly as presented in Figure 12b.

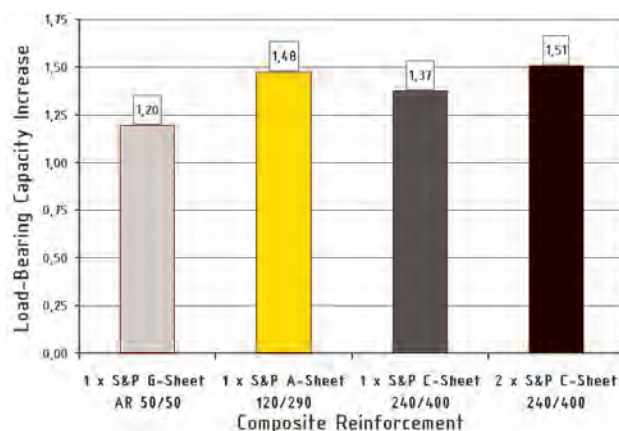
Table 4. Test results of selected beams reinforced with composite sheets

Composite sheet	Load-bearing capacity of beams without reinforcement $F_{0,max}$ [kN]	Load-bearing capacity of beams with reinforcement $F_{r,max}$ [kN]	Reinforcement ratio $F_{r,max} / F_{0,max}$
Glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50 (one – layer reinforcement)	15.2	18.2	1.20
Aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 (one – layer reinforcement)	10.5	15.5	1.48
Carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 (one – layer reinforcement)	11.2	15.4	1.37
Carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 (two – layer reinforcement)	13.2	19.9	1.51

4. Load-bearing capacity of selected beams reinforced with composite sheets

Basing on the results of the tests one should notice a significant increase in load-bearing capacity of beams reinforced with all types of composite sheets – from glass, aramid and carbon fibers. Load-bearing capacity of selected beams defined as the maximum force in bending $F_{r,max}$ increased by 20% in the case of the application of sheets from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50, 48% in the case of aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 and 37% for sheets from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400. The highest increase in loading of 51% was observed if the two – layer reinforcement from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 was applied. The test results and increase in load-bearing capacity of beams reinforced with composite sheets have been presented in Table 4.

The increase in load-bearing capacity of beams reinforced with composite sheets has been graphically presented in Figure 13.

**Fig. 13.** The increase in load-bearing capacity of selected beams reinforced with composite sheets

5. Summary

The analysis of the preliminary test results indicates that the application of the reinforcement in the form of composite sheets leads to the significant increase in load-bearing capacity of wooden beams. This effect observed in the beams reinforced with one – layer reinforcement was 20% in the case of the sheets from glass fibers S&P G-Sheet AR 50/50, 48% in the case of the sheets from aramid fibers S&P A-Sheet 120/290 and 37% in the case of the application of sheets from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400. Two – layer reinforcement from carbon fibers S&P C-Sheet 240/400 led to an increase in load-bearing capacity by 51%.

It can be concluded that composite sheets can be successfully used for reinforcement of beams and other wooden elements subjected to bending.

The transition of the preliminary results obtained in this study to real elements, namely wooden beams of cross – sectional dimensions between ten and twenty centimeters suggests that the best solution would be the two – layer composite reinforcement. From the technological point of view the best solution is the use of sheets from carbon fibers since their application and glueing is much more comfortable than sheets from glass and aramid fibers.

It should be concluded that composite sheets are a very good reinforcing material, which significantly increases load-bearing capacity of the wooden beams almost without increasing their cross – sectional dimensions. The application of reinforcement in the form of composite sheets helps to rise the class of the timber wood with regard to its bending strength by maximally several orders, which is a considerable effect from the practical point of view.

References

- [1] Gentile C., Svecova D., Rizkalla S., *Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications*, Journal of Composites for Construction 6(2002), pp. 11–20.
- [2] Jasieńko J., *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmocnieniu zabytkowych konstrukcji drewnianych*, DWE, Wrocław 2003.
- [3] PN-EN 408:2010, *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*.
- [4] S&P A-Sheet 120 Technical Data Sheet, S&P Clever Reinforcement Company AG, Seewen.
- [5] S&P C-Sheet 240 Technical Data Sheet, S&P Clever Reinforcement Company AG, Seewen.
- [6] S&P G-Sheet AR 50/50 Technical Data Sheet, S&P Clever Reinforcement Company AG, Seewen.

Paweł Kossakowski

Nośność belek drewnianych wzmocnionych matami kompozytowymi

1. Wprowadzenie

Na przestrzeni ostatnich lat kompozyty stały się podstawowymi materiałami używanymi w budownictwie do wzmocniania elementów konstrukcyjnych. Najczęściej kompozyty są stosowane do wzmocniania różnego rodzaju konstrukcji betonowych i żelbetowych, w mniejszym stopniu murowych i stalowych. Kompozyty znajdują również zastosowanie do wzmocniania elementów konstrukcyjnych wykonanych z innych materiałów, w tym drewna i materiałów drewnopochodnych.

Kompozyty stosowane do wzmocniania drewna to przede wszystkim lamele, które stosowane są w oparciu o systemy opracowane dla innych materiałów konstrukcyjnych. W mniejszym stopniu elementy drewniane wzmocniane są przy pomocy mat kompozytowych. Należy zaznaczyć, że z uwagi na nieliczne opracowane systemy wzmocniania konstrukcji drewnianych kompozytami pozwalające na precyzyjne szacowanie stopnia wzmocnienia, tematyka ta jest wciąż przedmiotem prowadzonych badań w kraju, a także za granicą np. [1, 2].

W niniejszym artykule podjęto i przedstawiono problematykę dotyczącą wzmocniania belek drewnianych przy użyciu mat kompozytowych. Przedstawiono wstępne wyniki badań wytrzymałościowych belek z drewna sosnowego, ukierunkowane na ocenę stopnia wzmocnienia przy zastosowaniu mat kompozytowych z włókien szklanych, aramidowych i węglowych.

2. Badania wytrzymałościowe belek wzmocnionych matami kompozytowymi

Przeprowadzone badania obejmowały testy wytrzymałościowe w zakresie zginania statycznego belek drewnianych bez wzmocnień oraz wzmocnionych matami kompozytowymi firmy S&P Clever Reinforcement Company AG. Zastosowano 3 rodzaje mat kompozytowych z włókien:

- szklanych S&P G-Sheet AR 50/50 o module sprężystości włókien $E = 65$ GPa,
- aramidowych S&P A-Sheet 120/290 o module sprężystości włókien $E = 120$ GPa,
- węglowych S&P C-Sheet 240/400 o module sprężystości włókien $E = 240$ GPa.

Parametry techniczne zastosowanych mat kompozytowych zestawiono w tabelach 1-3.

Na rysunku 1 pokazano badane belki wzmocnione jednowarstwowo matami z włókien szklanych S&P G-Sheet AR 50/50, aramidowych A-Sheet 120/290 i węglowych S&P C-Sheet 240/400.

W badaniach założono, że analizowane będą belki drewniane wzmocnione matami kompozytowymi jednowarstwowo, jednakże z uwagi na najlepsze własności aplikacyjne mat z włókien węglowych oraz ich wysokie parametry sprężysto-wytrzymałościowe, przeanalizowano również wzmocnienie belek drewnianych dwiema warstwami tych mat.

Badaniom wytrzymałościowym poddano belki z drewna sosnowego o wymiarach nominalnych

$b \times h \times L = 6 \times 8 \times 144$ cm, które zginano w zakresie statycznym. Przyjęto schemat statyczny tzw. „czteropunktowego” zginania pokazany na rysunku 2. W trakcie pomiarów rejestrowano w sposób ciągły siłę (obciążenie) F i ugięcie środkowej części przekroju belek w .

Na rysunku 3 pokazano stanowisko badawcze, na którym realizowano próbę statycznego zginania belek.

W pierwszym etapie badań określono parametry sprężyste drewna zgodnie z [3]. Dla liczebności próby $n = 10$ belek wartość średnia modułu sprężystości podłużnej drewna wyniosła $E_L = 9030 \pm 425,6$ MPa, przy odchyleniu standardowym $s = 686,7$ MPa oraz założonym poziomie ufności 95%.

Jako parametr określający wytrzymałość badanego drewna w kolejnym etapie wyznaczono jego wytrzymałość na zginanie zgodnie z [3]. Wyznaczona wartość średnia wytrzymałości na zginanie wyniosła $f_m = 46.9$ MPa dla zakresu naprężeń niszczących $34.3 \div 56.6$ MPa. Z uwagi na duży rozrzut uzyskanych wyników, który jest typowy dla drewna, w dalszych badaniach przyjęto metodę badania tych samych elementów, przed i po wzmocnieniu. Dzięki temu porównywane wielkości odnoszono do tego samego materiału, przez co zredukowano wpływ niejednorodności drewna na uzyskane wyniki.

W kolejnym etapie wykonano badania nośności belek wzmocnionych matami kompozytowymi. Nośność badanego elementu zdefiniowana została jako maksymalna siła (obciążenie) F_{max} w danej próbie, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2.

Następnie wykonano badania nośności belek o wymiarach $b \times h \times L = 6 \times 3,8 \times 68,4$ cm, które wycięto z belek wzmocnionych. Nośności dla belek o wymiarach $b \times h \times L = 6 \times 3,8 \times 68,4$ cm przeliczono na nośności belek o wymiarach $b \times h \times L = 6 \times 8 \times 144$ cm, tak aby uzyskane wyniki stanowiły wartości referencyjne dla belek wzmocnionych. Tym samym nośności belek wzmocnionych mogły być odnoszone do tych samych elementów i tego samego drewna przed i po wzmocnieniu.

3. Wyniki badań wybranych belek wzmocnionych matami kompozytowymi

3.1. Belki bez wzmocnień

Zniszczenie belek drewnianych bez wzmocnień następowało w spodniej części strefy środkowej (rys. 4), na skutek działania maksymalnego momentu gnącego powodującego przekroczenie wytrzymałości na rozciąganie drewna w skrajnych włóknach dolnych.

Analizując wykres zginania siła-ugięcie $F(w)$ pokazany na rysunku 5 należy zauważyć, że spadek sztywności belki następował dość wcześnie, bo w połowie próby. Zniszczenie materiału zachodziło etapowo. Po osiągnięciu nośności elementu następował gwałtowny spadek siły i wzmocnienie materiału, aż do całkowitego zniszczenia.

3.2. Belki wzmocnione matami z włókien szklanych S&P G-Sheet AR 50/50

W przypadku belek wzmocnionych matami z włókien szklanych S&P G-Sheet AR50/50 zniszczenie obejmowało zarówno strukturę drewna jak i wzmocnienie kompozytowe w spodniej części strefy środkowej. Nie stwierdzono zniszczeń mat kompozytowych w strefach przypodporowych. Zniszczenie mat kompozytowych oraz drewna następowało w końcowej fazie pracy belek na skutek utraty wytrzymałości na rozciąganie włókien kompozytowych.

Przejście belek wzmocnionych matami z włókien szklanych S&P G-Sheet AR 50/50 w nieliniowy zakres pracy materiału następowało dość wcześnie, bo dla około 0,4 maksymalnego ugięcia. W dalszym etapie obserwowano wypłaszczenie wykresu siła-ugięcie $F(w)$, aż do zniszczenia, które następowało w sposób nagły i niesygnalizowany, co widać wyraźnie na rysunku 7.

3.3. Belki wzmocnione matami z włókien aramidowych S&P A-Sheet 120/290

Jedną z belek wzmocnionych matą z włókien aramidowych S&P A-Sheet 120/290 została zniszczona zarówno w strefie środkowej, gdzie doszło do zniszczenia struktury drewna, jak również w strefie przypodporowej. W tym drugim przypadku nastąpiło ścięcie drewna wzdłuż słoików, tuż nad wzmocnieniem. O utracie nośności belki zdecydowała wytrzymałość drewna, natomiast zniszczenia maty z włókien aramidowych były nieznaczne. Wpływ na obserwowane zniszczenie miała również nieciągłość struktury materiałowej w postaci sęka, który był jego inicjatorem. W przypadku innej lokalizacji tego typu defektów obserwowano zniszczenia typowe dla pozostałych wzmocnionych elementów.

W przypadku analizowanej belki zniszczenie następowało etapowo, co widać wyraźnie na wykresie siła-ugięcie $F(w)$. Spadek sztywności sygnalizujący przejście materiału w zakres nieliniowy następowało bardzo wcześnie, na poziomie około 0,30 ugięcia maksymalnego. W dalszym etapie obserwowano obniżenie siły i zniszczenie zachodzące w kilku etapach, obejmujące strukturę drewna oraz delaminację wzmocnienia z maty aramidowej.

3.4. Belki wzmocnione matami z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400

Analogicznie do belek wzmocnionych matami z włókien szklanych również w przypadku zastosowania mat z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400 zniszczenie obejmowało zarówno strukturę drewna jak i wzmocnienie kompozytowe w spodniej części strefy środkowej, bez zniszczenia mat kompozytowych w strefach przypodporowych. Zniszczenie belek następowało w końcowej fazie pracy na skutek utraty wytrzymałości na rozciąganie włókien kompozytowych. Opisany sposób zniszczenia obserwowano zarówno przy zastosowaniu wzmocnienia jednowarstwowego jak i dwuwarstwowego (rys. 10 i 11).

Wykresy zginania siła-ugięcie $F(w)$ belek wzmocnionych matami z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400 były również zbliżone do wykresów uzyskanych dla belek wzmocnionych matami z włókien szklanych. W przypadku zastosowania pojedynczej warstwy wzmocnienia przejście materiału w zakres nieliniowy następowało przy poziomie około 0,5 maksymalnego ugięcia (rys. 12a). W przypadku zastosowania podwójnej warstwy wzmocnienia moment ten występował wyraźnie wcześniej, bo już przy około 0,3 ugięcia maksymalnego, którego maksymalna wartość była wyraźnie wyższa (rys. 12b) w porównaniu do ugięć rejestrowanych dla pozostałych belek wzmocnionych matami kompozytowymi.

W przypadku zastosowania wzmocnienia pojedynczego zniszczenie następowało etapowo, co uwidoczniło się spadkami siły zarejestrowanymi pod koniec testu (rys. 12a). Dla wzmocnienia podwójną matą z włókien węglowych obserwowano wypłaszczenie wykresu siła-ugięcie $F(w)$, aż do zniszczenia, które następowało w sposób nagły i niesygnalizowany, co widać wyraźnie na rysunku 12b.

4. Nośność wybranych belek wzmocnionych matami kompozytowymi

Analizując wyniki przeprowadzonych badań należy przede wszystkim zauważyć wyraźny i znaczący wzrost nośności belek wzmocnionych wszystkimi rodzajami mat kompozytowych, z włókien szklanych, aramidowych i węglowych. Nośność wybranych belek definiowana jako maksymalna siła (obciążenie) **w próbie zginania** $F_{r,max}$ wzrosła o 20% w przypadku zastosowania mat z włókien szklanych S&P G-Sheet AR 50/50, 48% w przypadku zastosowania mat z włókien aramidowych S&P A-Sheet 120/290 i 37% w przypadku zastosowania mat z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400. Najwyższy wzrost nośności

o 51% zaobserwowano w przypadku zastosowaniu podwójnej warstwy wzmacniającej z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400. Wyniki prób zginania i wzrostu nośności wybranych belek wzmocnionych matami kompozytowymi zestawiono w tabeli 4.

Wzrost nośności belek wzmocnionych matami kompozytowymi przedstawiono graficznie na wykresie pokazanym na rysunku 13.

5. Podsumowanie

Analizując wyniki przeprowadzonych badań wstępnych należy, że w wyniku zastosowania wzmocnienia rozciąganej części przekroju matami kompozytowymi uzyskano zauważalne efekty w zakresie podniesienia nośności belek drewnianych. Wzrost nośności w grupie wybranych belek wzmocnionych jednowarstwowo wyniósł 20% w przypadku zastosowania mat z włókien szklanych S&P G-Sheet AR 50/50, 48% w przypadku zastosowania mat z włókien aramidowych S&P A-Sheet 120/290 i 37% w przypadku zastosowania mat z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400. Przy zastosowaniu podwójnej warstwy maty z włókien węglowych S&P C-Sheet 240/400 wzrost nośności wyniósł 51%.

Można zatem z stwierdzić, że maty kompozytowe z powodzeniem mogą znaleźć zastosowanie do wzmacniania belek oraz innych drewnianych elementów konstrukcyjnych poddanych zginaniu.

Odnosząc uzyskane wstępne wyniki badań do elementów rzeczywistych, tj. belek drewnianych o wymiarach boków przekroju poprzecznego rzędu kilkunastu centymetrów, można przewidywać, że najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie wzmocnienia w postaci podwójnej warstwy maty kompozytowej. Z technologicznego punktu widzenia najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie mat z włókien węglowych, gdyż ich przygotowanie i klejenie jest o wiele wygodniejsze w porównaniu do mat z włókien szklanych i aramidowych, których montaż jest trudniejszy.

Podsumowując należy stwierdzić, że maty kompozytowe to bardzo dobry materiał wzmacniający, który znacząco podwyższa nośność belek drewnianych w zasadzie bez zwiększania wymiarów przekroju poprzecznego. Zastosowanie wzmocnienia przy pomocy mat kompozytowych pozwala na podniesienie klasy drewna sosnowego w zakresie wytrzymałości na zginanie maksymalnie o kilka rzędów, co z praktycznego punktu widzenia jest efektem znaczącym.