

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ СТІЧОК ДЛЯ ПІДСИЛЕННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ¹, Микола КОМАР²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-7404-4757>

²kolya.komar0519@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

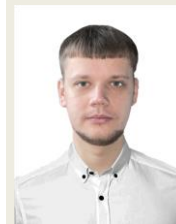
Анотація. В XXI столітті будівельна галузь розвивається шаленими темпами. На конкуренцію великогабаритним конструкціям приходять аналоги з такого ж матеріалу, проте зменшені в перерізах за допомогою підсилення їх композитними матеріалами.

Композитними вважають матеріали з умовно новими експлуатаційними та фізико-механічними властивостями, які створені за рахунок спільної роботи двох або більше компонентів які відрізняються структурою, хімічним складом, фізико-механічними характеристиками. Одними з перших композитних матеріалів вважають залізобетон, який широко застосовувався в кінці XIX століття. На початку XX століття для потреб кораблебудування, авіації, космонавтики тощо, набувають розвитку сучасні композитні матеріали такі, як склопластик, що складався зі штучних неперервних скляних волокон та штучної полімерної матриці винайдені А.К. Буровим і його співробітниками, в 30-х роках минулого сторіччя [1]. За часів Великої Вітчизняної війни пластини з склопластику використовували замість алюмінію в літакобудуванні. В 60-х роках минулого сторіччя у Великобританії були розроблені вуглецеві волокна, а в Сполучених Штатах Америки – борні, що надало поштовх до розвитку нового покоління композитних матеріалів, які мали високий модуль пружності та високу міцність, що дозволило значно збільшити сферу їхнього застосування.

Можна зазначити, що більшість композитних матеріалів добре опираються багатьом хімічним впливам: лугам, кислотам, хлоридам, сульфатам,



Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ
професор кафедри металевих та
дерев'яних конструкцій
д.т.н., доцент



Микола КОМАР
аспірант кафедри металевих та
дерев'яних конструкцій

там, нітратам та іншим. Всі вони не є небезпечними для здоров'я людини в умовах нормальної експлуатації при використанні індивідуальних засобів захисту при безпосередньому виконанні робіт по підсиленню. Це дозволяє їх використовувати, як в промисловому та сільськогосподарському будівництві де має місце безпосередній вплив зовнішнього середовища на конструкцію підсилену композитними матеріалами, так і в житлових будівлях без шкоди для жителів. Після аналізу створення та використання композитних матеріалів для підсилення конструкцій з різних матеріалів, а також методів їхнього застосування та фізико-механічних властивостей, допущено, що такі матеріали можуть, чудово поєднуватись з конструкціями з цільної та клеєної деревини, дозволяючи збільшити несучу здатність при зменшенні їхнього поперечного перерізу.

Ключові слова. Композитні матеріали; конструкції з клеєної деревини; дерев'яні конструкції; підсилення; композитні полотна; композитні стрічки.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Деревина, як матеріал має давню історію, а спектр її застосування з давніх часів, досить широкий. Від посуду та меблів, до житлових будинків, церков та інших споруд з деревини. В сучасному світі, окрім всього цього, деревину використовують, як конструкційний матеріал в різноманітних елементах. Незважаючи на те, що сама деревина має низку негативних властивостей таких, як: схильність до усушки і розбухання, піддатливість гниттю, неоднорідну волокнисту структуру, що безперечно потребує особливого уваги при будівництві для зменшення причин їхнього прояву, а в окремих випадках і обмеження застосування такої деревини в конструкціях [2]. З деревини виготовляють різного типу погонні деталі, паркет, столярні вироби деревоволокнисті плити та іншу продукцію, а поява клеєної деревини для виготовлення будівельних конструкцій, що застосовуються при зведенні житлових будинків та промислових будівель, взагалі допомогла уникнути значної частини цих недоліків (наявність сучків, косошарості, впливу вологості, неоднорідності).

Конструкції з клеєної деревини (ККД) мають підвищену несучу здатність, вогнестійкість та довговічність з порівняно малою власною вагою, завдяки чому їх можна використовувати для перекриття великих прольотів (до 100 м) без великих навантажень на опори. Крім того, технологія виготовлення ККД дозволяє отримувати криволінійні елементи різної форми, які використовуються, також, для створення різноманітних складних архітектурних форм [3]. Елементи та конструкції з цільної та клеєної деревини ефективні для зведення виробничих, сільськогосподарських споруд, мостів, стадіонів та споруд хімічної промисловості [4].

Проте є певні обмеження застосування ККД, як, наприклад, обмежена будівельна

висота, за якої використання ККД з досить великою висотою поперечного перерізу унеможливується. Тому актуальності набирають дослідження підсиленних (армованих) конструкцій з клеєної деревини, для збільшення несучої здатності та жорсткості при зменшенні їхнього поперечного перерізу.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Загальні данні композитних матеріалів.

Розвиток сучасних композитних матеріалів, перш за все, був викликаним потребами кораблебудування, авіації, космонавтики де вони найшли широке застосування. Одним із перших сучасних композитних матеріалів був одно направлений склопластик, що складався зі штучних непереривних скляних волокон та штучної полімерної матриці винайдені А.К. Буровим і його співробітниками, в 30-х роках [1]. За часів Великої Вітчизняної війни пластини з склопластику використовували замість алюмінію в літакобудуванні. В 60-х роках минулого століття у Великобританії були розроблені вуглецеві волокна, а в Сполучених Штатах Америки – борні, що надало поштовх до розвитку нового покоління композитних матеріалів, які мали високий модуль пружності, високу міцність та жорсткість, що дозволило збільшити сферу їхнього застосування.

За часту сам композитний матеріал складається з двох компонентів – неперервна фаза (матриця) та наповнювач. Матриця може бути металева, керамічна, або полімерна. Наповнювач в вигляді волокон або частинок зазвичай виготовлюють з міцних та жорстких матеріалів (вуглецю, скла, арамиду, поліетилену, сталі, бору, карбиду, кремнія тощо). Волокна в матриці можуть бути хаотично розташованими або мати певний напрямок орієнтації (рис.1.).

Композитні матеріали на основі фібри (волокон), які зараз використовують для ремонту та підсилення будівельних конструкцій, виготовляють з продовговуватих мікро волокон замонолічених в затверджуваному полімері, з'єднуючи їх в одне ціле.

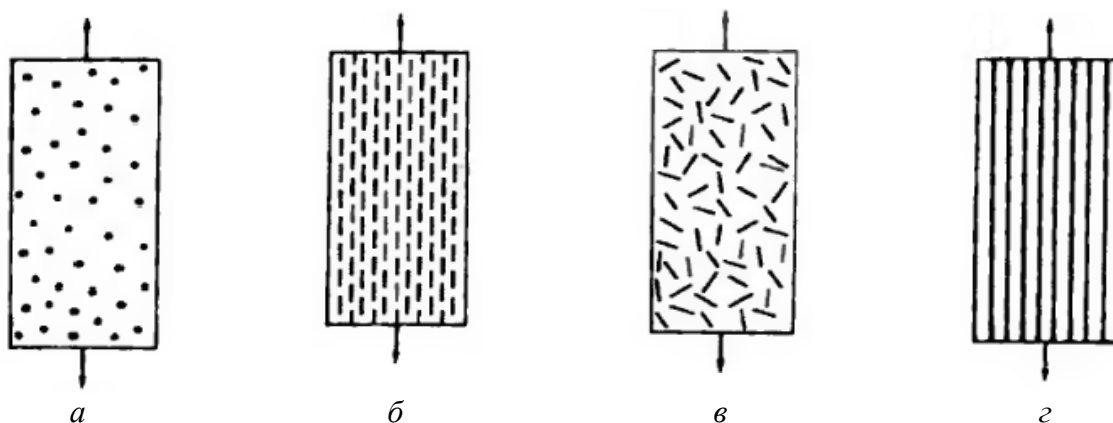


Рис.1. Приклади композитів:

a – наповнений випадково розподіленими частинками;

б – одно напрямлені короткі волокна ;

в – випадково орієнтовані короткі волокна;

г – одно напрямлені неперервні волокна [5].

Fig.1. Examples of compositions:

a - filled with randomly distributed parts;

b - one-way short fibers;

c - randomly oriented short fibers; *d* - unidirectional continuous fibers [5].

Вуглецеві арамідні та скловолокна є найбільш поширеними типами волокон. В якості затвердженого полімера найчастіше використовують епоксидні та поліакрилонітрильні смоли. Саме в підсилені будівельних конструкцій використовують композитні матеріали з вуглецевими волокнами. Найбільш розповсюджені форми використання для підсилення композиційних матеріалів є полотна різного плетіння та смуги або пластини. Платна представляють собою гнучку тканину з одно або дво- спрямованим розташуванням волокон, які при встановленні на конструкцію занурюються в полімерний клей – матрицю, яка забезпечує

щільне прилягання до конструкції. Смуги або пластини – це виготовлені в заводських умовах вироби з композиційних матеріалів, які приклеюються на завчасно підготовлену поверхню конструкції.

Фізико-механічні властивості композитних матеріалів визначаються типом та кількістю використаних волокон, їхнього розподілу та орієнтації в поперечному перерізі стрічки, а також об'ємним співвідношенням волокон та затвердженого полімера в композиті. В таблицях 1 та 2 наведені типові механічні властивості композитних матеріалів та затверджених полімерів відповідно.

Табл. 1. Типові властивості волокон композитних матеріалів

Table 1. Typical properties of fibers of composite materials

Тип фібри	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа	Деформації зусиль, %	Щільність, т/м ³
Вуглець з високою міцністю*	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8
Вуглець з високим модулем пружності*	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Вуглець з високим модулем пружності**	2600 – 4020	540 – 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Арамід***	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Скло	2400 – 3500	70 – 85	3,5 – 4,7	2,6

*На поліакрилонітрильній матриці

**На матриці з епоксидної смоли

***Арамід може мати таку ж міцність з меншим модулем пружності

Табл. 2. Властивості затверджуючих полімерів
Table 2. Properties of curing polymers

Фізико механічні властивості полімерів	Фірма виробник				
	MBT	SBD	DML composites	Sika	Sumitomo
Міцність на розтяг, МПа	50	17	81	30	29
Міцність при згині, МПа	120	28	–	–	–
Модуль пружності при згині, ГПа	3	5	–	3,8	2,5
Температура скління, °С	55	60, 80	59	53	55

Композитні матеріали на основі вуглецевих, арамідних та скловолокон не мають пластичних зон деформування тому, через можливе їхнє крихке руйнування, розпочали проводити нові дослідження по створенню композитних матеріалів в яких в якості елементу армування виступає нове покоління сталевих волокон [6]. Такі сталеві волокна діаметром до 1 мм складаються із в'язаних сталевих пасм діаметром менше 1 мікрона, затверджувані в епоксидному полімері. В англомовній літературі такий матеріал отримав назву SRP (Steel Reinforced Polymer), з якого виготовляють композитний матеріал в вигляді тканинних полотн товщиною до 5 мм. Лабораторні дослідження цих матеріалів показали, що вони мають міцність на розтяг до 750 МПа, тобто майже в шість раз менше ніж у матеріалів з основою із вуглецевих волокон, а модуль пружності співставний з сталлю.

Проте вагомою перевагою таких матеріалів є пластичність, наявність плавної неспадаючої кривої на заграничній ділянці деформації, та саме головне, при використанні їх з конструкціями із металу та залізобетону, їхні близькі деформації зі сталлю та сталеву арматурою, що забезпечує майже повне використання міцнісних характеристик обох матеріалів.

Вибір типу композиційних матеріалів для підсилення визначається умовами експлуатації та призначення конструкцій що підсилюються. Тип волокон які будуть застосовуватись та їхнє розташування в матеріалі (одно або двох спрямоване) обумовлює міцнісні та деформаційні характеристики полотна композиційних матеріалів.

При двох спрямованому розташуванні зазвичай 70% волокон знаходяться в напрямку в якому передбачається дія основного зовнішнього зусилля, та 30% – в поперечному напрямку. При цьому міцність такого матеріалу в основному напрямку значно знижується. Проте, окрім механічних параметрів композитних матеріалів, безпосередньо потрібних для розрахунку несучої здатності конструкцій, що підсилюються при проектуванні необхідно враховувати доволі багато інших фізичних параметрів, які в подальшому впливають на експлуатацію відремонтованої споруди: стійкість до хімічного впливу та ударного навантаження, довготривала міцність, вогнестійкість та електропровідність, відповідність санітарно-гігієнічних вимог та деякі інші. Такі як:

- Деформативність при стиску;
- Супротив ударним навантаженням;
- Вплив вогню;
- Стійкість до хімічного впливу;
- Електропровідність;
- Реологічні властивості;
- Безпека та санітарія.

2. Застосування композитних стрічок при підсиленні будівельних конструкцій.

Система підсилення конструкцій композитними матеріалами складається з двох важливих складових – сам композитний матеріал та адгезив або клеючий склад. Успішне функціонування такої системи залежить, як від надійності роботи кожної із складових, так і від надійності їхньої спільної роботи. Основним призначенням клеючої складової окрім приклеювання є сприйняття зсувних та відривних зусиль між з'єднувальними поверхнями. Для приклеювання композитного

матеріалу до бетонної та поверхні деревини, найчастіше використовують епоксидні двокомпонентні клеючі склади, здатні схоплюватись при позитивній температурі навколишнього середовища.

Найбільш поширені клеючі склади наведені в табл. 3.

Табл. 3. Клеючі склади, що використовуються світовими фірмами виробниками
Table 3. Adhesive compositions used by global manufacturers

Параметри	Постачальник та торговельна марка				
	Exchem Resifix 31	MBT Mbrace adhesive	SBD Epoxy Plus	Sika Sikadur	Resiplast Epicol U
Міцність на розтяг, МПа	24	30	19	30	50
Міцність на згин, МПа	55	100	35	–	–
Міцність на зсув, МПа	22	–	18	–	–
Модуль згину, МПа	6,5	3,5	9,8	12,8	–
Модуль зсуву, МПа	3,8	–	–	–	–
Температура скління, Tg, °C	60	56	60,8	–	60

Більшість адгезивів використовуються для з'єднання сухих поверхонь. Для склеювання вологих поверхонь та для з'єднання конструкцій що знаходяться в воді, розроблені спеціальні клеючі склади, як правило на епоксидній смолі. Для досягнення якісного зчеплення композитного матеріалу з бетоном не менш важливим фактором повинні бути температурно-вологісні умови в місці проведення робіт та якість підготовки поверхні конструкції що підсилюється. Забруднена, а тим паче нерівна поверхня не може забезпечити необхідного за якістю зчеплення з композитним матеріалом.

Автор статті [7] ставить перед собою мету вивчення технологічних особливостей підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами при реконструкції споруд, з метою зменшення ваги, матеріаломісткості, збереження зовнішнього вигляду після реконструкції, а також врахуючи вплив такого методу підсилення на всіх стейкхолдерів та беручи до уваги економічні фактори. Та доводить що основними цілями підсилення металевих конструкцій фіброармованими полімерами є збільшення або відновлення міцності на розтяг, збільшення або відновлення міцності на згин, підвищення втомної міцності. В роботі виконано огляд технологічних особливостей і

актуальних проблем в області підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами, а також зачеплена історична перспектива цього методу реновації. Наведена таблиця мінімальних допусків по товщині дефекту які слід визначати неруйнівними методами контролю. У статті розглянуті проблеми методу підсилення конструкцій з використанням композитних матеріалів. Зазначено що в Україні відсутня нормативно-дослідна база, присвячена проблемі підсилення металевих будівельних конструкцій композитними матеріалами, тому є можливість використовувати виключно зарубіжний досвід і рекомендації при проектуванні такого роду підсилень. Основний принцип розміщення композитних елементів підсилення полягає в паралельному розташуванні напруженням розтягу. Автор відзначив, що значний ефект від підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами може бути досягнутий при підсиленні балок покриття промислових будівель або великопрольотних конструкцій, які при підсиленні традиційними методами вимагають складних конструктивних рішень, великих витрат праці, зупинки технологічного процесу виробництва для виконання робіт із підсилення, вага підсилюючої конструкції часто виявляється значною. А для застосування

композитних матеріалів для підсилення металевих конструкцій потребує лише встановлення легких риштувань (можлива робота автопідйомників), що не займає багато часу.

В статті [8] проведено аналіз досліджень підсилення композитними стрічками залізобетонних конструкцій в роботах Шилина А.А., Зятюка Ю.Ю., Журавського О.Д. та інших.

Та як бачимо, з наведеного огляду в статті [8], досліджень підсилення конструкцій з цільної та клеєної деревини композитними матеріалами дуже мало, і вони спрямовані лише на конкретну конструктивну форму, - балку. Тому є актуальним дослідження використання в підсиленні дерев'яних конструкцій (балок, рам, панелей з поперечно-клеєної деревини) композитних матеріалів – у вигляді стержнів, стрічок, та полотен.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Провівши аналіз досліджень композитних матеріалів їхньої історії та сфери використання, складу, фізико-механічних властивостей, взаємодії з різними несучими конструкціями та інших фізичних параметрів при цьому засвідчити про невеликий досвід їхньої взаємодії з дерев'яними конструкціями та ККД можна зробити висновок, що подальші дослідження спільної роботи цих елементів є цілком доцільними. А проведений аналіз допоможе в майбутньому збільшити діапазон використання нових конструктивних елементів на основі поєднання деревини та композитних стрічок не тільки балок, а й інших відомих в світі конструкцій (арок, рам, панелей з ПКД тощо). Враховуючи відсутність вказівок та розрахунків для використання таких конструкцій в вітчизняних нормах [9, 10] можна зробити висновки, що проведення подальших досліджень в цій сфері – є актуальною науковою задачею.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мэттьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология./ Мэттьюз Ф., Ролингс Р. :- // М.: Техносфера, 2004. 400 с.
2. Попельнух В. М. Проективання дерев'яних

конструкцій: //навч. посіб.: Харків: ХНАМГ, 2008. 207 с.

3. Михайловський Д.В. Аналіз техніко-технологічних властивостей клеєної деревини як перспективного матеріалу для будівельних конструкцій / Д. В. Михайловський, М. С. Коваленко, Д. М. Матюшенко. // *Чернігівський науковий часопис. Серія 2, Техніка і природа.* – 2011. – С. 122–127.
4. Леденев В. В., Проектирование конструкций специальных инженерных сооружений /Ярцев В. П., Однолько В. Г// учеб. пособ. Тамбов: ТИХМ, 1991. 99 с.
5. Шилин А. Л., Каргузов Д. В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. Москва: Стройиздат, 2007. 184 с.
6. Huang X., Birman V., Nanni A., Tunis G. Properties and Potential for Application of Steel Reinforced Polymer (SRP) and Steel Reinforced Grout (SRG) Composites. *Internet. University, of Missouri-Rolla, 2003, 27 p.*
7. Руднева І. Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції. // Зб. наук. праць Будівельні конструкції Теорія і практика.- Київ: КНУБА.-2021.- №8. С. 32 - 43. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43>.
8. Михайловский Д., Армування конструкцій з деревини композитними матеріалами, стан і перспективи. / Комар М. //Зб.наук. праць Будівельні конструкції. Теорія і практика Київ: КНУБА.-2021.- №9. - С. 72 – 80. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80> -.
9. ДСТУ-Б.В.2.6-217-2016 «Проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини.» // Київ, "Укрархбудінформ" 2016. – 143 с.
10. ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції. Основні положення.» // - Київ, "Укрархбудінформ" 2017. – 125 с.

REFERENCES

1. F.Mettiuz R. Rolyngs. Kompozytne materyaly. Mekhanyka y tekhnolohiya. M.: Tekhnosfera, 2004. 400 s.
2. V. M. Popelnukh. Proektuvannia derevianykh konstrukttsii: //навч. посіб.: Kharkiv: KhNAMH, 2008. 207 s.
3. Mykhailovskyi D. V. Analiz tekhniko-tekhnolohichnykh vlastyvostei kleienoї dere-vyny yak

- perspektyvnoho materialu dlia budivelnikh konstrukttsii. / Mykhailovskiy D. V., Kovalenko M. S., Matiushchenko. D. M.-// *Chernihivskiy naukovyi chasopys. Seriya 2, Tekhnika i pryroda. 2011. S. 122–127.*
4. **Ledenev V. V.** Proektyrovanye konstruktsyi spetsyalnykh ynzhenerykh sooruzheniy. \ Yartsev V. P., Odnolko V. H: // *ucheb. posob. Tambov: TYKhM, 1991. 99 s.*
 5. **Shylyn A. L.** Vneshnee armyrovanye zhelezobetonnnykh konstruktsiyi kompozytsionnykh materialamy. / Kartuzov D. V. // *Moskva: Stroiyzdat, 2007. 184 s.*
 6. **Huang X.** Properties and Potential for Application of Steel Reinforced Polymer (SRP) and Steel Reinforced Grout (SRG) Composites. // *Internet. University, of Missouri-Rolla, 2003, 27 p.*
 7. **Rudnieva I.** Tekhnolohichni osoblyvosti pidsylennia metalevykh konstrukttsii metodom nakleiuvannia vysokomitsnykh fibroarmovanykh system pry rekonstrukttsii. // *Zb. nauk. prats Budivelni konstrukttsiiu Teoriia i praktyka.- Kyiv: KNUBA.-2021.- №8. S. 32 - 43. [https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43.](https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43)*
 8. **Mykhailovskiy D.,** Armuvannia konstrukttsii z derevyny kompozytnykh materialamy, stan i perspektyvy. /Komar M. // *Zb.nauk. prats Budivelni konstrukttsii. Teoriia i praktyka Kyiv: KNUBA.-2021.- №9. - S. 72 – 80. [https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80.](https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80)*
 9. **DSTU-B.V.2.6-217-2016** «Proektuvannia budivelnnykh konstrukttsii z tsilnoi i kleienoii derevyny.» // *Kyiv, "Ukrarkhbudinform" 2016. – 143 s.*
 10. **DBN V.2.6-161:2017** «Dereviani konstrukttsii. Osnovni polozhennia.» // *Kyiv, "Ukrarkhbudinform" 2017. – 125 s.*

ANALYSIS OF RESEARCH APPLICATIONS OF COMPOSITE TAPE FOR REINFORCEMENT OF WOODEN STRUCTURES

*Denis MYKHAYLOVSKYI,
Mykola KOMAR*

Стаття надійшла до редакції 20.04.2022

Summary. In the XXI century, the construction industry is developing at a rapid pace. Competitors of the same material, but reduced in cross-section by strengthening them with composite materials, compete with large-sized structures.

Composite materials are considered to have relatively new operational and physical-mechanical properties, which are created due to the joint work of two or more components that differ in structure, chemical composition, physical and mechanical characteristics. One of the first composite materials is considered to be reinforced concrete, which was widely used in the late XIX century. At the beginning of the XX century for the needs of shipbuilding, aviation, aerospace, etc., modern composite materials such as fiberglass, consisting of artificial continuous glass fibers and artificial polymer matrix invented by A.K. Burov and his colleagues in the 30s of last century [1]. During the Great Patriotic War, fiberglass plates were used instead of aluminum in aircraft construction. In the 1960s, carbon fiber was developed in the United Kingdom and boron in the United States, which gave impetus to the development of a new generation of composite materials with high modulus of elasticity and high strength, which significantly increased their scope. .

It can be noted that most composite materials are well resistant to many chemical influences: alkalis, acids, chlorides, sulfates, nitrates and others. All of them are not dangerous to human health in normal operation with the use of personal protective equipment in the direct performance of reinforcement work. This allows them to be used both in industrial and agricultural construction where there is a direct impact of the external environment on the structure reinforced with composite materials, and in residential buildings without harm to residents.

After analyzing the creation and use of composite materials to strengthen structures of different materials, as well as methods of their application and physical and mechanical properties, it is assumed that such materials can be perfectly combined with solid and glued wood structures, increasing load-bearing capacity while reducing their cross section.

Keywords. Composite materials; plywood constructions; wooden constructions; reinforcements; composite canvases; composite tapes.