

Геннадій Болотов, Максим Болотов

ОСОБЛИВОСТІ З'ЄДНАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВУЗЛАХ МАШИН ТА БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вступ. Композиційні матеріали (КМ) володіють комплексом властивостей, що відрізняють їх від традиційних конструкційних матеріалів (металів і сплавів), і в сукупності відкривають широкі можливості, як для вдосконалення існуючих конструкцій самого різного призначення, так і для розробки нових конструкцій.

Постановка проблеми. Процес виготовлення конструкцій із застосуванням композитів складається з операцій з'єднання різних елементів у вузли та агрегати. Конструктивне оформлення з'єднань композитних елементів характеризується значною різноманітністю. Кожне з'єднання володіє перевагами та недоліками і їх вибір залежить від характеру і величини навантажень, розмірів деталей, фізико-механічних властивостей матеріалів, умов експлуатації, вартості. Звідси виникають технологічні проблеми при з'єднанні деталей з КМ, пов'язані, в першу чергу, із вибором оптимального способу з'єднання.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз особливостей основних способів з'єднання волокнистих композиційних матеріалів на полімерній основі та визначення галузей їх застосування для створення конструкцій.

Викладення основного матеріалу. Композиційні матеріали, у більшості, володіють незначними деформаціями руйнування, тому навіть їх несуттєве подовження може призвести до локального руйнування композита вже в процесі застосування різьбових з'єднань або клепок при механічному з'єднанні. Шаруватість структури композитів призводить до переважання шарів КМ, що прилягають до клейового прошарку, і може викликати їх відрив або розширення при адгезійних способах з'єднання. Ці особливості слід враховувати при виборі виду з'єднань та оцінці їх міцності.

Механічні способи з'єднання доцільно застосовувати при наявності значних розширюючих напружень, коли необхідні особливі критерії надійності і у випадку обов'язкового періодичного розбирання конструкції, при цьому слід враховувати вплив появи у з'єднанні концентраторів напружень.

Адгезійні (клеєні) з'єднання забезпечують суттєве зниження концентрації напружень, що дозволяє підвищити межю міцності в умовах дії як статичних, так і динамічних навантажень, із одночасним зниженням маси конструкції і вартості вузлів з композиційних матеріалів.

Висновки. Вибір та застосування виду з'єднання композиційних матеріалів залежить від типу навантажень (статичні або втомні), надійності, легкості у виробництві, вартості та від спеціальних умов (необхідності отримання розбірних, розсувних або інших видів з'єднань).

Ключові слова: волокнисті композиційні матеріали; полімерна матриця; способи з'єднання; галузь застосування.

Рис.: 9. Бібл.: 8.

Вступ. Композиційні матеріали (КМ) являють собою гетерофазні системи, побудовані з двох або більше компонентів зі збереженням індивідуальності кожного окремого компонента. Здебільшого компоненти КМ розрізняються за геометричною ознакою. Один з компонентів володіє неперервністю по усьому об'єму і є матрицею. Другий компонент є переривчастим, розподіленим у об'ємі, і вважається підсилюючим або армуючим. Як матричні матеріали найбільше поширення знайшли метали (в основному, алюміній) та полімери. Армуючими компонентами для силових елементів конструкцій з композитів у авіабудуванні, суднобудуванні, космічній техніці переважно є волокнисті матеріали різної природи (вуглецеві та борні волокна, високоміцні арамідні та скловолокна). Армовані композиції з успіхом застосовуються замість таких різноманітних матеріалів, як бетон, деревина, сталь, алюміній.

Композиційні матеріали володіють комплексом властивостей, що відрізняють їх від традиційних конструкційних матеріалів (металів і сплавів), і в сукупності відкривають широкі можливості як для вдосконалення існуючих конструкцій самого різного призначення, так і для розробки нових конструкцій і технологічних процесів.

Постановка проблеми. Процес виготовлення конструкцій із застосуванням композитів складається з операцій з'єднання різних елементів (листів, профілів, балок, стержнів) у вузли та агрегати. Конструктивне оформлення з'єднань композитних елементів характеризується значною різноманітністю і залежить як від призначення і відповідних вимог, так і від технологічних операцій, за допомогою яких вони виконуються.

Відмінності фізико-механічних властивостей композитів від аналогічних властивостей традиційних металів (анізотропія міцнісних характеристик, низька міжшарова міцність, гетерогенність структури та ін.) призводять до того, що ці матеріали значно гірше, ніж метали, забезпечують передавання зусиль з одного елемента до іншого.

Елементи, що утворюють вузол або виріб, можуть бути з'єднаними між собою за допомогою клеєного прошарку, механічного кріплення (болтами, заклепками), або поєднанням цих способів [1]. Композиційні матеріали із металевою матрицею можуть з'єднуватись також за допомогою зварювання.

Кожне з'єднання володіє особливостями, перевагами та недоліками і вибір будь-якого з них залежить від багатьох факторів – характеру і величини навантажень, розмірів деталей, фізико-механічних властивостей матеріалів, умов експлуатації, вартості. Звідси виникають технологічні проблеми при з'єднанні деталей з КМ між собою та з деталями з традиційних матеріалів, пов'язані передусім із вибором оптимального способу з'єднання.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз особливостей основних способів з'єднання волокнистих композиційних матеріалів на полімерній основі та визначення галузей їх застосування для створення конструкцій.

Викладення основного матеріалу. Волокнисті композиційні матеріали складаються з багатьох шарів армуючої компоненти (волокон). Ця компонента сприймає розтягуючі та стискаючі навантаження, а зв'язуюча їх основа (матриця) перерозподіляє напруження між волокнами і запобігає втраті їх стійкості.

Композиційні матеріали здебільшого володіють незначними деформаціями руйнування (близько 1...2 %), тому навіть їх несуттєве подовження може призвести до локального руйнування композита вже у процесі затягування різьбових з'єднань або клепання при механічному з'єднанні [2]. Шаруватість структури композитів призводить до перевантаження шарів КМ, що прилягають до клейового прошарку, і може викликати їх відрив або розшарування при адгезійних способах з'єднання. Ці особливості слід враховувати при виборі виду з'єднань та оцінці їх міцності.

Будь-яку конструкцію з композиційних матеріалів можна розглядати як комбінацію окремих елементів різної форми (листи, балки, оболонки та ін.), з'єднаних в одне ціле. Комбінуючи ці елементи, можливо отримати значну кількість різних за геометрією з'єднань. На практиці їх можна привести до декількох основних видів: стикові, напусткові та кутові. На рис. 1 наведені основні типи механічних з'єднань композиційних матеріалів [3], звідки видно, що це переважно відносно прості з'єднання напусткового типу. Для підсилення можуть застосовуватись ті ж з'єднання, але з удвоєними елементами, які знижують рівень зсувних напружень. Загалом, основні умови проектування з'єднань композиційних матеріалів залежать від типу структур композитів, призначення з'єднаних деталей, умов експлуатації та інших факторів.

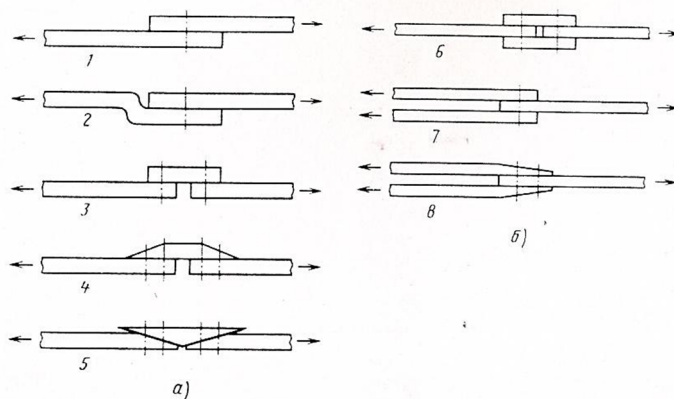


Рис.1. Види механічних з'єднань композиційних матеріалів:

- а – прості з'єднання: 1 – звичайне напусткове; 2 – напусткове із вигином; 3 – стикове із накладкою; 4 – стикове із зкошеною накладкою; 5 – з'єднання у вус із накладкою; б – двійні з'єднання: 6 – стикове із двома накладками; 7 – двостороннє напусткове; 8 – скошене двостороннє напусткове*

При проектуванні механічних з'єднань композитів необхідно спочатку експериментально визначити основні показники міцності композитів на зминання, зрізання та розрив із урахуванням напрямку дії зовнішнього навантаження. Далі виконується теоретичний аналіз розподілу навантажень та напружень у з'єднанні і здійснюється вибір оптимальних параметрів з'єднання виходячи з умови його рівномірності (рис. 2) [2]:

$$P_c = P_{o.c} = P_{cm} = P_{cp} = P_{cp.t},$$

де $P_{o.c}$, P_{cm} , P_{cp} , $P_{cp.t}$ – навантаження, що руйнують зразок відповідно по послабленому перерізу, в результаті зминання, зрізання та зрізання силової точки.

Оскільки для композиційних матеріалів ця умова не виконується однозначно, то ефективність їх з'єднань оцінюють як [4]

$$K_{ef} = F_c / F_{km},$$

де F_c – міцність з'єднання; F_{km} – міцність композиційного матеріалу.

Як і при проектуванні з'єднань елементів з металів, для композиційних матеріалів також застосовується поняття запасу міцності. При проектуванні у літакобудуванні конструкцій з металевих деталей запас міцності обирається рівним 1,5. Для композиційних матеріалів, які практично не володіють текучістю, запас міцності обирається рівним 3.

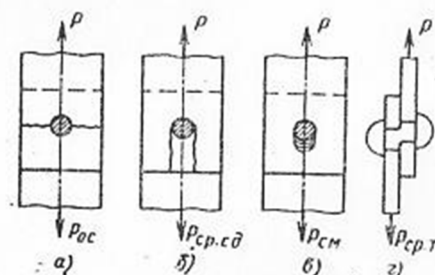


Рис. 2. Форми руйнувань механічних з'єднань композитних елементів:
 а – руйнування по послабленому перерізу; б – зрізання-зсув композита;
 в – зминання композита; г – зрізання силової точки

Заклепкові та різьбові з'єднання плоских композиційних панелей можуть виконуватись як із зенковкою під потайні головки, так і без неї. Зокрема, конструювання з'єднань склопластикових матеріалів засновано на використанні з'єднувальних елементів без потайних головок, для чого необхідно знати тільки діаметр отвору, який залежить від товщини з'єднуваних пластин. Для пластин товщиною менше 1 мм можуть застосовуватись додатково накладки із роззенкованими отворами. Якщо конструкція передбачає наявність багатьох отворів, то між ними повинна бути передбачена певна відстань. Відстань між суміжними рядами визначається по центрах отворів у кожному ряду (рис. 3). Найчастіше ця відстань обирається рівною п'яти діаметрам отворів, що забезпечує достатній запас міцності.

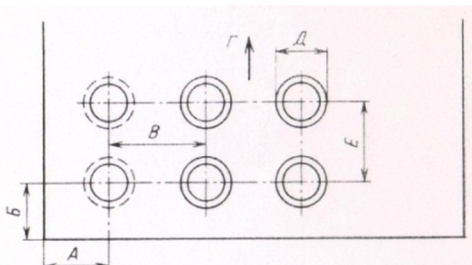


Рис. 3. Болтові з'єднання деталей з композитів:
 А, Б – віддалення центру отвору від кромки та краю листа;
 В – відстань між центрами отворів впоперек листа; Г – напрямок прикладання навантаження; Д – діаметр кріпильного виробу (болта); Е – відстань між центрами отворів вздовж листа

Крім простоти, особливістю механічних з'єднань композиційних матеріалів є те, що вони можуть не тільки витримувати значні навантаження, а й перерозподіляти їх, що знижує, в цілому, експлуатаційні навантаження на елементи з'єднання. Разом з тим необхідно враховувати навантаження, що виникають при самому процесі з'єднання. Зазвичай такі навантаження не повинні перевищувати 10 % від загального аксіального навантаження на композит. Пошкодження композита при з'єднанні можуть призвести до його передчасного руйнування при стисканні або розтягуванні, тому дуже важливо запобігати його руйнування при затисканні. Крім того, свердління отворів завжди пов'язане із руйнуванням волокон, і міцність таких з'єднань залежить від міцності матеріалу матриці. Підвищують міцність болтових та заклепкових з'єднань додатковим армуванням накладками з корозійно-стійкої сталі або титанових сплавів [5].

Суттєві недоліки механічних з'єднань композиційних матеріалів, які в першу чергу пов'язані з наявністю концентраторів напружень і найбільш яскраво проявляються в умовах дії динамічних навантажень, обмежують їх застосування у певних галузях, зокрема, літакобудуванні. В цих випадках для створення конструкційних структур ефективно застосовують адгезійні способи з'єднання композитів між собою та з іншими металами. Адгезійно з'єднані елементи почали застосовувати у літакобудуванні ще з 1945 року. Адгезійні з'єднання мають суттєві переваги перед механічними, зокрема:

- адгезійні з'єднання є меншими концентраторами напружень, ніж механічні, завдяки чому зростає межа міцності при статичному навантаженні;
- адгезійні з'єднання можуть бути спроектовані таким чином, що будуть мати гладку зовнішню поверхню і володіти мінімальною можливістю для розповсюдження тріщин;
- можуть бути легко з'єднані значні площі, причому вартість такого з'єднання буде суттєво нижче, ніж механічного.

Класичні види адгезійних з'єднань схематично зображені на рис. 4 [6].

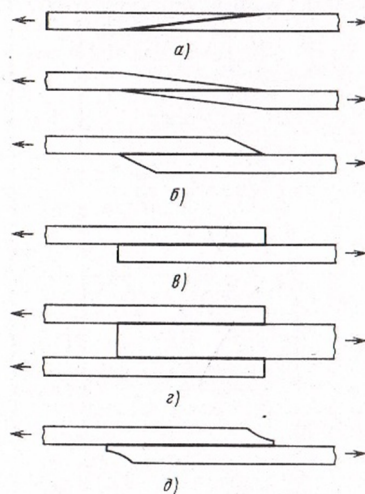


Рис. 4. Види адгезійних з'єднань:

а – вуз; б – напусткове із скосом; в – просте напусткове;
г – двійне напусткове; д – модифіковане напусткове

Кожен з видів з'єднань має свої переваги залежно від характеру і напрямку прикладання навантажень. З'єднання, яке добре витримує навантаження при стисканні, може незадовільно працювати на розтягування або зминання. Типовий розподіл напружень у вузлах адгезійно з'єднаних композитів наведений на рис. 5 [7], звідки видно, що дотичні напруження по довжині клеєного з'єднання розподіляються нерівномірно і мають максимальне значення на кінцях напустку. При збільшенні довжини напустку максимальні напруження знижуються і після досягнення певної межі залишаються незмінними.

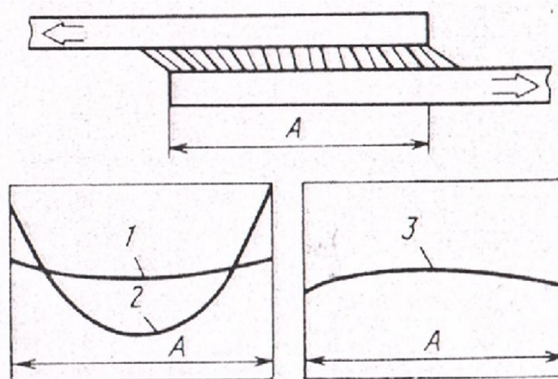


Рис. 5. Розподіл напружень зсуву в адгезійному напустковому з'єднанні довжиною A: 1 – еластифікований адгезив (нееластичний із високим опором зсуву); 2 – стандартний розподіл зсувних напружень для нормального адгезиву; 3 – оптимальна крива розподілу зсувних напружень

На рис. 6 показано, що для простого напусткового з'єднання із збільшенням довжини перекриття утримуюче питоме зусилля зростає пропорційно ширині, а зсувні напруження в адгезійному шарі залишаються постійними або навіть знижуються.

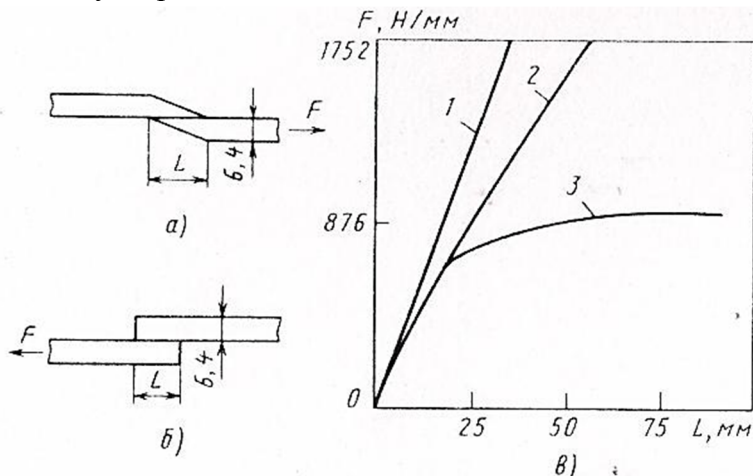


Рис. 6. Вплив довжини перекриття на міцність плоских напусткових з'єднань: а – із скосом кромки; б – із прямими кромками; в – залежність питомої (на 1 мм ширини) міцності з'єднань F від довжини напустку L; 1 – теоретична крива; 2 та 3 – криві з'єднань відповідно із скосом кромки та без скосу кромки

Особливістю адгезійних з'єднань є залежність внутрішніх напружень не тільки від навантаження, а й від температури. Підвищена температура експлуатації конструкцій, що мають з'єднання, призводить до зростання термічних напружень, особливо якщо коефіцієнти лінійного розширення окремих елементів не збігаються. Крім того, напруження зростають ще внаслідок того, що лінійні коефіцієнти термічного розширення адгезійного шару не збігаються із їх значеннями для з'єднуваних елементів. Оскільки елементи конструкції повинні працювати у широкому діапазоні температур (що є особливо важливим для авіаційної техніки), існування температурних напружень повинно обов'язково враховуватись. Аналітична оцінка середніх зсувних напружень, що виникають у з'єднанні під впливом перепадів температур, оцінюється виразом [7]

$$\tau_0 = \frac{\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2}{1/E_1 + 1/E_2},$$

де τ_0 – середнє зсувне напруження; E_1, E_2 – модулі пружності з'єднаних матеріалів; a_1, a_2 – коефіцієнти лінійного розширення тих же матеріалів; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – різниця температур елементів з'єднання і температури отвердженого адгезиву.

Максимальні залишкові напруження тим вище, чим тонше клейовий прошарок, вище його модуль пружності і менше різниця жорсткостей з'єднаних матеріалів. Необхідно враховувати також, що напруження, які виникають у з'єднаних елементах, можуть викликати вигин (викривлення) з'єднання, притому тим більший, чим більше різниця жорсткостей елементів. На рис. 7 наведені типові градієнти напружень для різних термодформаційних умов у з'єднанні.

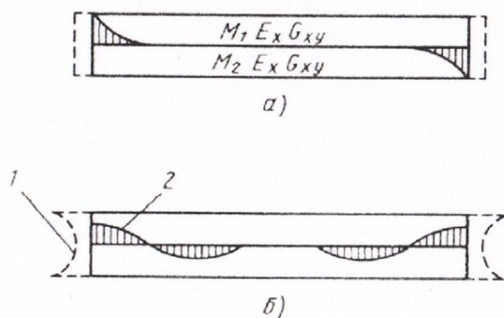


Рис. 7. Епюри напружень, що виникають унаслідок різниці температурних коефіцієнтів лінійного розширення елементів з'єднання: а – розширення одного елемента відносно іншого; б – одночасне розширення обох елементів;

1 – форма торців внаслідок нагріву; 2 – градієнт напружень

Втомні властивості адгезійних з'єднань композиційних матеріалів визначаються, в основному, властивостями адгезива. Крім того, вони залежать також від характеристик з'єднання й умов експлуатації таким чином:

- 1) втомні властивості підвищуються зі збільшенням довжини перекриття напусткового з'єднання;
- 2) втомні властивості адгезива знижуються із ростом товщини з'єднаних елементів;
- 3) залежно від типу адгезиву вплив температури на втомні властивості з'єднання може бути протилежним.

При прикладанні циклічного стискуючого навантаження адгезійно з'єднані зразки забезпечують на 25 % більшу стійкість у порівнянні з механічними з'єднаннями. Особливо суттєві переваги адгезійне з'єднання забезпечує при багатоциклового навантаженні. Порівняльний аналіз стійкості в цих умовах для різних типів з'єднань наведений на рис. 8 [8].

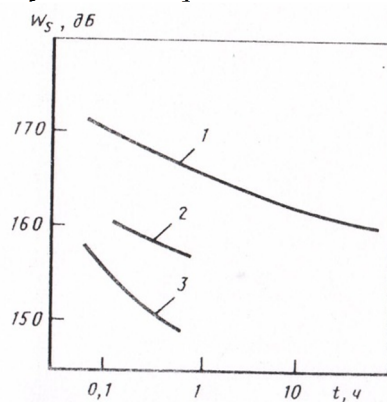


Рис. 8. Втомні властивості клеєних та заклепкових конструкцій під дією навантажень звукової частоти інтенсивністю W_s та тривалістю t :

1 – сандвічеві конструкції із сотовим наповнювачем; 2 – адгезійні (клеєні) з'єднання; 3 – заклепкові з'єднання

Зі збільшенням товщини з'єднуваних матеріалів для усіх видів з'єднань показники ефективності знижуються (рис. 9) [2]. Це пояснюється зростанням кількості рядів і, відповідно, кількості кріпильних елементів у механічних з'єднаннях, та збільшення ексцентриситету передавання навантажень у адгезійних. З наведеного рисунку видно, що область ефективного застосування клеєних з'єднань знаходиться у межах до 1,6 мм товщини з'єднуваних деталей. Для заклепкових з'єднань ефективна область товщин становить 1,5...3,0 мм, а для болтових – більше 3 мм. Для стикових з'єднань оболонки із товщиною матеріалу більше 8 мм доцільно застосовувати штифтоболтові з'єднання.

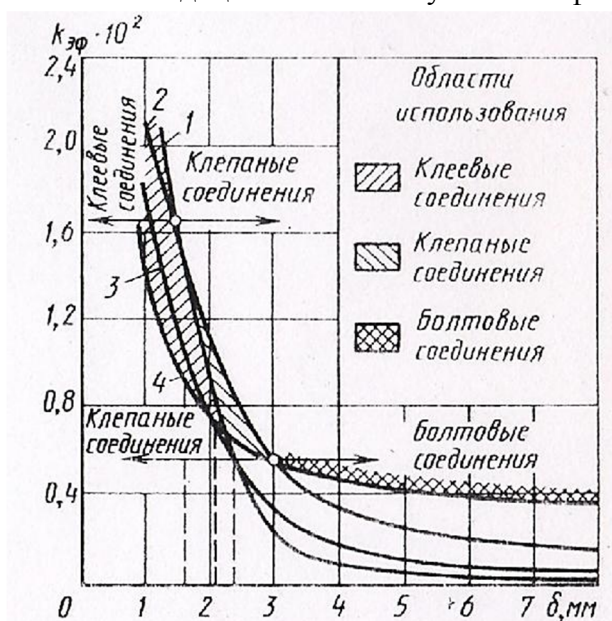


Рис. 9. Области ефективного застосування різних видів з'єднань композитів:
1 – клеєні; 2 – заклепкові; 3 – заклепково-клеєні; 4 – болтові

Висновки.

1. Вибір та застосування виду з'єднання композиційних матеріалів залежить від типу навантажень (статичні або втомні), надійності, легкості у виробництві, вартості та від спеціальних умов (необхідності отримання розбірних, розсувних або інших видів з'єднань).

2. Механічні способи з'єднання доцільно застосовувати за наявності значних розшаровуючих напружень, коли необхідні особливі критерії надійності й у випадку обов'язкового періодичного розбирання конструкції, при цьому слід враховувати вплив появи у з'єднанні концентраторів напружень.

Адгезійні (клеєні) з'єднання забезпечують суттєве зниження концентрації напружень, що дозволяє підвищити межу міцності в умовах дії як статичних, так і динамічних навантажень, із одночасним зниженням маси конструкції і вартості вузлів з композиційних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Воробей В. В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, О. С. Сироткин. – М. : Машиностроение, 1985. – 166 с.
2. Композиционные материалы: справочник / под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. Strauss E.L. How to Design Mechanical Joints / Materials in Design Engineering, February, 1963.
4. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. – М. : Машиностроение, 1988. – 584 с.
5. Царахов Ю. С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов / Ю. С. Царахов. – М. : МАТИ, 1980. – 80 с.

6. Jungstrom O. L. Design Aspects of Bonded Structures / O. L. Jungstrom // Aircraft Bulletin, No. 4, Bonded Structures, LTD, Duxford, England, May 1959.
7. Bloomingdale Rubber Division of American Cyanamid Co., Handbook for Adhesives, 1957.
8. Catchpole E.J. Bonding and Sandwich Construction /Aeroplane and Astronautics, June, 1961.

References

1. Vorobey, V.V., Sirotkin, O.S. (1985). *Soedineniia konstruksii iz kompozitsionnykh materialov [Compound structures from composite materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
2. Vasilev, V.V. (ed.), Tarnopolskii, Yu.M. (1990). *Kompozitsionnye materialy: spravochnik [Composite materials. Reference book]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
3. Strauss, E.L. (1963). How to Design Mechanical Joints. *Materials in Design Engineering*, February.
4. Liubin, Dzh. (ed.) (1988). *Spravochnik po kompozitsionnym materialam [Handbook of composite materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
5. Tsarakhov, Yu.S. (1980). *Konstruirovaniie soedinenii elementov LA iz kompozitsionnykh materialov [Construction of compounds of aircraft elements from composite materials]*. Moscow: MATI (in Russian).
6. Jungstrom, O.L. Design Aspects of Bonded Structures. *Aircraft Bulletin*, No. 4, Bonded Structures, LTD, Duxford, England, May 1959.
7. Bloomingdale Rubber Division of American Cyanamid Co., Handbook for Adhesives, 1957.
8. Catchpole E. J. Bonding and Sandwich Construction. *Aeroplane and Astronautics*, June, 1961.

UDC 669.018:624.1

Gennadyi Bolotov, Maksym Bolotov

FEATURES OF CONNECTION OF COMPOSITE MATERIALS IN MACHINE UNITS AND BUILDING STRUCTURES

Urgency of the research. Composite materials (CM) have a complex of properties that distinguish them from traditional construction materials (metals and alloys), and in combination open up wide opportunities, both for improving existing designs of various purposes, and for developing new designs.

Target setting. The process of manufacturing structures using composites consists of operations of connecting various elements into knots and aggregates. Constructive design of compounds of composite elements is characterized by considerable variety. Each connection has advantages and disadvantages and their choice depends on the nature and size of loads, the size of parts, physical and mechanical properties of materials, conditions of operation, cost. Hence there are technological problems when connecting parts with KM, connected, first of all, with the choice of the optimal method of connection.

The research objective. The aim of the work is to analyze the peculiarities of the main methods of combining fibrous composite materials on a polymeric basis and to determine the branches of their application for the construction of structures.

The statement of the basic material. Composite materials, in most cases, have insignificant deformations, so even their insignificant elongation can lead to local destruction of the composite already during the tightening of threaded joints or riveting during mechanical connection. The lamination of the composite structure leads to an overload of the CM layers adjacent to the adhesive layer and can cause their separation or delamination in adhesion bonding methods. These features should be considered when choosing the type of joints and assessing their strength.

Mechanical methods of connection is advisable to use in the presence of significant stratification stresses, when necessary special reliability criteria and in the case of mandatory periodic disassembly of the structure, while taking into account the effect of the appearance of the connection of stress concentrators..

Adhesive (laminated) connections provide a significant reduction in stress concentration, allow to increase the ultimate strength under conditions of both static and dynamic loads, while reducing the weight of the structure and the cost of assemblies of composite materials.

Conclusions. Selection and application of composite materials type depends on the type of loads (static or fatigue), reliability, facility of **manufacture**, cost and special conditions (the need for collapsible, sliding or other kinds of connections).

Key words: fibrous composite materials; polymer matrix; ways to connect; field of application.

Fig.: 9. Bibl.: 8.

УДК 669.018:624.1

Геннадий Болотов, Максим Болотов

ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ МАШИН И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены конструктивные особенности механических и адгезионных соединений волокнистых композиционных материалов на полимерной основе, определены основные условия их проектирования и область применения. Проведен анализ особенностей основных способов соединения волокнистых композиционных материалов на полимерной основе и определения отраслей их применения для создания конструкций.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Ключевые слова: волокнистые композиционные материалы; полимерная матрица; способы соединения; область применения.

Рис.: 9. *Библ.:* 8.

Болотов Геннадій Павлович – доктор технічних наук, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (95, вул. Шевченка, 14027, м. Чернігів, Україна).

Болотов Геннадий Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (95, ул. Шевченко, 14027, г. Чернигов, Украина).

Bolotov Gennadiy – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovgp@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Болотов Максим Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (95, вул. Шевченка, 14027, м. Чернігів, Україна).

Болотов Максим Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (95, ул. Шевченко, 14027, г. Чернигов, Украина).

Bolotov Maksym – PhD in Technical Sciences, Seniore Lecturer of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovmg@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0915-4132>