

УДК 621.763-233.3

А.Ю. ДОВГОПОЛОВ,

С.С. НЕКРАСОВ, канд. техн. наук, Суми, Україна

РОЗ'ЄМНІ З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ

З метою дослідження можливості утворення компонентів роз'ємних з'єднань деталей машин з вуглепластику, була проведена порівняльна характеристика різних критеріїв міцності, напружень та деформацій що виникають в основних роз'ємних з'єднаннях з аналогічними параметрами виробів з вуглепластиків. На основі проведеного порівняльного аналізу встановлена можливість, розрахунку оптимальних характеристик матеріалу, компонентів з'єднання. Завдяки чому запропонована можливість застосування вуглепластику у роз'ємних з'єднаннях, для яких основні критичні напруження задовольняють умовам міцності та жорсткості даного композиційного матеріалу, при використанні правильної схеми армування, де основні силові фактори які виникають в з'єднанні направлені в напрямку армування волокон.

Ключові слова: вуглепластик; роз'ємні з'єднання; напруження; міцність; жорсткість

С целью исследования возможности создания компонентов разъемных соединений деталей машин из углепластика, была проведена сравнительная характеристика различных критериев прочности, напряжений и деформаций, возникающих в основных разъемных соединениях с аналогичными параметрами изделий из углепластика. На основе проведенного сравнительного анализа установлена возможность расчета оптимальных характеристик материала, компонентов соединения. Благодаря чему получена возможность применения углепластика в разъемных соединениях, для которых основные критические напряжения удовлетворяют условиям прочности и жесткости данного композиционного материала, при использовании правильной схемы армирования, где основные силовые факторы, возникающие в соединении, направлены в направлении армирования волокон.

Ключевые слова: углепластик; разъемные соединения; напряжения; прочность; жесткость

In order to study the possibility of creating components detachable joints of machine parts from CFRP, was held a comparative analysis of various strength criteria, voltages and strains arising in the main detachable joints with the same parameters at the CFRP products. On the basis of the comparative analysis was established the possibility calculate the optimum material properties, the compound of components. Due to this there is the possibility of using CFRP in detachable joints, for which the main critical voltages satisfy the conditions of the strength and stiffness of the composite material, using the proper reinforcement scheme, where the main force factors arising in connection directed towards the reinforcement fibers.

Keywords: CFRP; detachable connections; voltages; strength; rigidity

Постановка проблеми. Використання нових матеріалів розкриває нові можливості для виготовлення, машин та механізмів з високим ККД, зниженим енергоспоживанням та малою масою. Останнім часом, вуглепластик, почали широко використовувати для виготовлення корпусних деталей машин. Це матеріал, який має високу граничну міцність (1000 - 2600 МПа) та низький коефіцієнт тертя (в парі, «вуглепластик-сталь 45» значення коливається в межах від 0,1 до 0,17 в залежності від дослідних

умов), за рахунок використання в своєму складі, вуглецевих волокон. Саме завдяки задовільним даним характеристикам, вважається можливим, виготовлення компонентів роз'ємних з'єднань деталей машин.

Виготовлення роз'ємних з'єднань з вуглепластику є складним інженерним завданням. Оскільки завдяки анізотропним властивостям, досить складно дослідити поведінку вуглепластику при тому чи іншому навантаженні. Саме тому, для його успішного вирішення, необхідно розрахувати оптимальні характеристики матеріалу компонентів з'єднання.

Основним завданням на етапі розробки компонентів роз'ємних з'єднань з вуглепластику є передбачення того, наскільки воно буде здатне функціонувати в заданих експлуатаційних умовах. Це вимагає врахування напружень і деформацій, що виникають в з'єднанні під дією навантажень, а також розрахунку різних критеріїв міцності деталей з'єднання. При цьому визначаються не тільки граничні напруження і прогресуюче руйнування, але й потрібно врахувати процеси, пов'язані з розшаруванням, виникненням і зростанням тріщин, а також цілий ряд інших фізичних ефектів.

Саме тому, для вирішення одного із основних завдань, створення компонентів роз'ємних з'єднання з вуглепластику, запропоновано порівняти напружено-деформований стан, основних роз'ємних з'єднань з напруженнями, деформаціями та різними критеріями міцності для виробів з вуглепластику.

Метою даної роботи є визначення можливості застосування вуглепластику для виготовлення компонентів роз'ємних з'єднань, за рахунок проведення порівняльної характеристики різних критеріїв міцності, напружень та деформацій що виникають в основних роз'ємних з'єднаннях з аналогічними параметрами вуглепластикових виробів

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням дослідження напружено – деформованого стану основних з'єднань в авіабудуванні присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. В аналітичному огляді Артюхіна Ю. П. міститься досить детальний аналіз методик для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) з'єднань з безперервним з'єднувальним шаром (наприклад, клейових) [2]. Запропоновані в роботі Карпова Я. С. нові способи з'єднання композиційних матеріалів (КМ) базуються на комбінації безперервного з'єднувального елемента (клей, будь який інший з'єднувальний матеріал) з дискретними кріпильними елементами (штифти, шайби, ребра) [8].

Механічні з'єднання (заклепкові, болтові, нарізні і т.п.) є основним способом складання конструкцій, та залишається таким і для деталей і агрегатів з композиційних матеріалів. Роботи Карпова Я.С., Воробья В.В. та Сироткина О.С. присвячені дослідженню напружено-деформованого стану механічних з'єднань з композиційних матеріалів [9-12]. Baker A.A. та

Ніу М.С. досить детально, описали, в своїх роботах, розробку основних типів з'єднань для деталей літальних апаратів [3, 13].

Dugao L. M., Матвиенко В. А. в своїх роботах пов'язаних з механічною обробкою сучасних композиційних матеріалів встановили, що даний процес є вельми емким та дорогим, та вимагає застосування нового інструменту та обладнання [5, 14]. Карпов Я. С., у своїй роботі присвяченій дослідженню з'єднанню високонавантажених деталей з композиційних матеріалів, ґрунтуючись на запропонованих способах з'єднань деталей з КМ, стверджує, що традиційні види з'єднань, які активно застосовуються для металевих конструкцій, малоефективні для композитів [8]. Продовжуючи досліджувати з'єднання деталей з композиційних матеріалів Карпов Я. С., у своїй більш пізній роботі встановив, що для конструкцій з КМ слід застосовувати інші, нетрадиційні види з'єднань – мікроштіфтове (рис. 1), тобто з'єднання з поздовжніми і поперечними зв'язками, які утворюють гетерогенну структуру КМ, не порушують цілісності волокон і завдяки мінімізації кріпильних елементів в меншій мірі деформують напружене поле при передачі зусиль від однієї деталі до іншої [15].

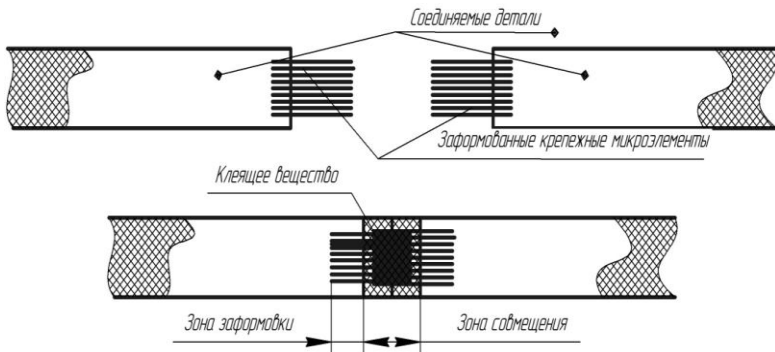


Рисунок 1 – Спосіб з'єднання з поздовжніми заформованими кріпильними елементами [15]

Незважаючи на високу ціну КМ, складність ремонту і з'єднання конструкцій з КМ, композити активно впроваджують у військову техніку, машинобудування, спорт і медицину. Саме тому, задача отримання якісних роз'ємних з'єднань з вуглепластику є актуальною задачею.

При опрацюванні публікацій, в яких піднята проблема дослідження напружено-деформованого стану вуглепластику, публікацій де описанні різноманітні з'єднання деталей літальних апаратів, було встановлено що раніше, питання порівняльного аналізу різних критеріїв міцності, напружень

та деформацій що виникають в роз'ємних з'єднаннях (шпонковому, шліцьовому та нарізному) з аналогічними параметрами вуглепластикових виробів, ніким з вітчизняних та зарубіжних вчених досить детально не розглядалося. Саме тому в роботі і був проведений даний аналіз, щоб встановити можливість досягнення поставленої мети.

Викладення основного матеріалу

Напружено-деформований стан шпонкового, шліцьового та нарізного роз'ємних з'єднань

З'єднання за можливістю розбирання ділять на нероз'ємні, які не можна розібрати без руйнування або пошкодження складових частин (заклепкові, зварні), та роз'ємні, які можна розібрати без порушення цілісності складових частин деталей або їх елементів. Найбільш розповсюдженими в машинобудуванні видами роз'ємних з'єднань є: нарізні, шпонкові, шліцьові, профільні [6].

З'єднання вважаються досить важливими елементами конструкцій. Більшість аварій та інші несправності в роботі машин обумовленні незадовільною конструкцією з'єднань.

Основним критерієм працездатності і розрахунку з'єднання вважається його міцність – статична та тривала. Також необхідно враховувати кількість складань деталей без руйнування поверхонь.

В зв'язку із необхідністю зберігання точності під навантаженням з'єднання повинні задовольняти умову жорсткості.

Міцність є основним критерієм працездатності нарізних з'єднань. Під дією осрової сили (сили натяжки) в стержні гвинта виникають напруги розтягу – в тілі гайки – стиснення, в нитках різі – зминання, зрізу. Головним критерієм працездатності стандартних кріпильних деталей прийнята: міцність стержня на розтяг, і по ній ведуть розрахунок болтів, гвинтів і шпильок. На рис. 2 показаний розподіл напружень та деформацій у нарізному з'єднанні [6].

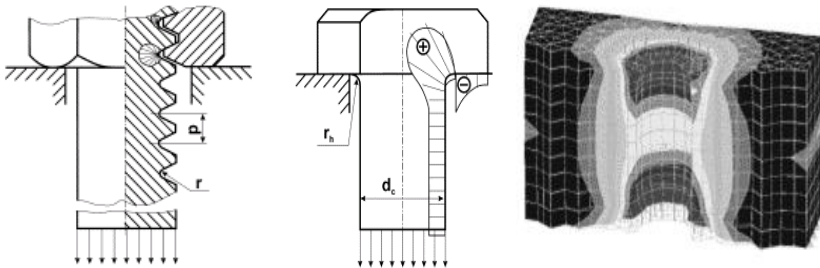


Рисунок 2 – Розподіл напружень та деформацій в нарізному з'єднанні

Шпонкові з'єднання з призматичними шпонками найбільш застосовувані в машинобудуванні. Момент T з валу на маточину передається боковими гранями шпонки. На цих бокових гранях виникають напруження зминання $\sigma_{зм}$, а в повздовжньому розрізі шпонки – напруження зрізу $\tau_{зр}$ [4].

Опір бокових поверхонь зубів зношуванню і зминанню – основні критерії працездатності шліцьових з'єднань. Нерухомі шліцьові з'єднання розраховують тільки на зминання (при відсутності осьових навантажень). Основні види напружень шпонкового та шліцьового з'єднань представлені на рис. 3.

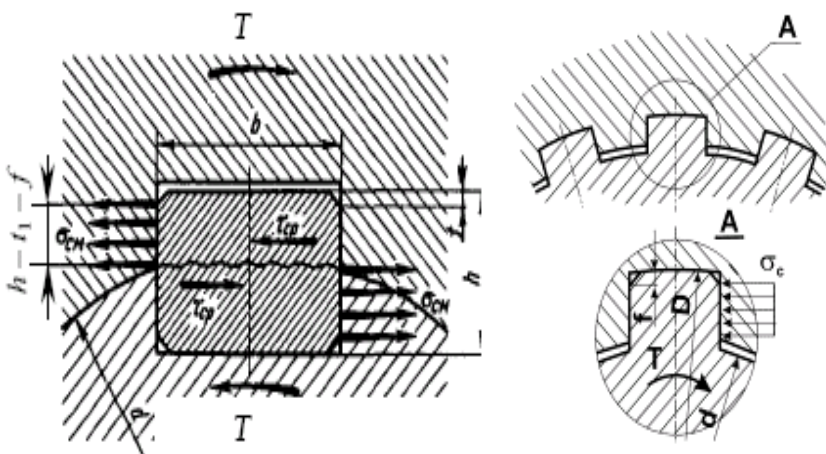


Рисунок 3 – Силкові схеми шпонкового та шліцьового з'єднань

Властивості вуглепластику при різних напружено - деформованих станах. Для проектування будь якого виробу основне це, наявність достовірної інформації про механічні властивості матеріалу. Разом з тим, властивості вуглепластику залежать від багатьох факторів, основні це характер армування, технологія виготовлення, та подальша термічна обробка.

Переваги та високі механічні характеристики вуглепластику (та інших композиційних матеріалів) найбільш істотно реалізуються в орієнтованих матеріалах, армованих паралельними волокнами, тобто в так званих односпрямованих шарах, шляхом укладання таких шарів у різних напрямках (рис. 4).

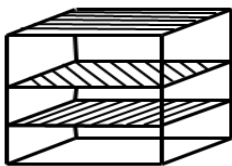


Рисунок 4 – Багатшаровий вуглепластиковий матеріал із односпрямованих шарів [2]

Волокна сприймають основну частку навантаження у вуглепластику гранична міцність та питома жорсткість даних армуючих елементів, значно вища за деякі метали. Порівняння властивостей деяких композиційних матеріалів з металами представлено в табл. 1.

Міцність вуглепластику залежить від багатьох факторів, одним із яких є напрямок прикладеної сили, відносно волокон, тому його застосування при тривимірному навантаженні характеризується низькою міцністю при нормальних навантаженнях. Залежність міцності вуглепластику від напрямку прикладання сили представлена на рисунку 2. Згідно графіку представленого на рисунку 5, вуглепластик, краще за металеві сплави, витримує поздовжні навантаження, а за поперечними навантаженнями – істотно їм поступається. Саме тому раціонально застосовувати його при роботі на розтяг або стискання вздовж волокон. Найбільш перспективними, для отримання компонентів роз'ємних з'єднань, на сьогодні вважаються композиційні матеріали армовані вуглецевими волокнами – вуглепластики.

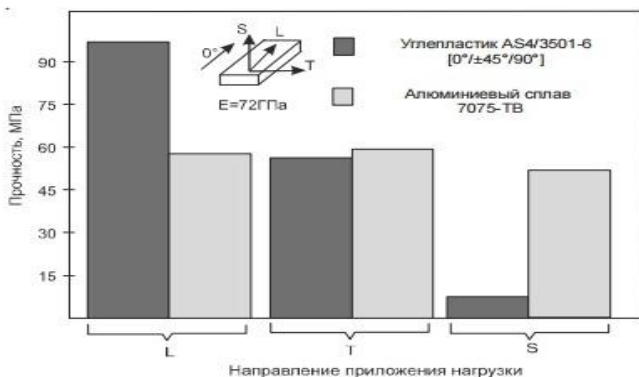


Рисунок 5 – Залежність міцності вуглепластику від напрямку прикладання сили [5]

Таблиця 1 – Порівняння властивостей композиційних матеріалів з конструкційними матеріалами [3]

Параметри	Скло-пластик	Вугле-пластик	Алюміній 7050-Т7451	Сталь РН138М0
Густина $\cdot 10^{-3}$, кг/м ³	2,1	1,5	2,82	7,76
Межа міцності, МПа:				
при розтяганні вздовж волокон	1250	1130	485	1385
при розтяганні перпендикулярно волокнам	35	42	-	-
при стисканні вздовж волокон	600	1130	-	-
при зсуві	68	63	-	-
Питома міцність при розтяганні вздовж волокон $\cdot 10^{-3}$, м.	83	73	172	178
Модуль пружності, ГПа:				
вздовж волокон	45	137	72	205
перпендикулярно волокнам	12	7	-	-
Модуль зсуву, ГПа	4,5	4,2	27	80
Питома жорсткість $\cdot 10^{-6}$, м	22	88	25,5	26,4

Висновки. У результаті проведеної порівняльної характеристики різних критеріїв міцності, напружень та деформацій що виникають в основних роз'ємних з'єднаннях з аналогічними параметрами виробів з вуглепластиків було визначено що, утворення компонентів роз'ємних з'єднань із даного матеріалу, бажане лише у випадку, коли основні напруження в з'єднанні направлені в повздовжньому напрямку (вздовж армуючих елементів). Оскільки, як було визначено вище даний матеріал краще за металеві сплави, витримує поздовжні навантаження, а за поперечними навантаженнями – істотно їм поступається. Це одна із основних умов, яка має виконуватися при створенні роз'ємних з'єднань з цього матеріалу.

Застосувати вуглепластик можливо, у роз'ємних з'єднаннях, у яких основні критичні напруження задовольнятимуть умовам міцності та жорсткості даного композиційного матеріалу. Вуглепластик ми можемо використати для утворення нарізних, шпонкових та шліцьових з'єднань, якщо армуючі елементи композиту в з'єднанні будуть направлені у напрямку прикладення основних напружень.

Створити компоненти роз'ємних з'єднань із розглянутого вище композиційного матеріалу можливо, оскільки згідно отриманої в результаті дослідження інформації робимо висновок що, по питомим характеристикам міцності та жорсткості у поздовжніх напрямках, цей матеріал не поступаються іншим конструкційним матеріалам, з яких виготовлялися компоненти з'єднань, а порівняно з деякими навіть їх перевищує.

Список використаних джерел: 1. *Анурьев В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Анурьев. – М. Машиностроение, 2001. 2. *Артюхин Ю. П.* Напряжения в клеевых соединениях / Ю. П. Артюхин // Исследования по теории пластин и оболочек. – Киев: Изд-во Киев. гос. ун-та, 1973. – Вып. 10. – С. 3 - 27. 3. *Baker A. A.* Composite Materials for Aircraft Structures / A. A. Baker. – Eurospan, 2004. – 400 p. 4. *Верещака С. М.* Механіка композиційних матеріалів: навчальний посібник / М. Верещака. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 160 с. 5. *Durao L. M.* Machining of hybrid composites : Ph.D. dissertation / L. M. Durao. – Porto, 2005. – 242 p. 6. *Криворучко Д. В.* Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др.; под общей ред. проф. В. А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2013. 272с 7. *Устюгов И. И.* Детали машин. Учебное пособие для учащихся заочных техникумов / И. И. Устюгов – М.: Высшая школа, 1973. – 472 с. 8. *Карпов Я. С.* Соединения высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщ. 1. Конструктивно-технологические решения и оценка их работоспособности / Я. С. Карпов // Пробл. прочности. – 2006. – № 3. – С. 23 – 33. 9. *Ворожей В. В.* Соединения конструкций из композиционных материалов / В. В. Ворожей, О. С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с. 10. *Карпов Я. С.* Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с. 11. *Карпов Я. С.* Научные основы решения проблемы соединения высоко-нагруженных деталей летательных аппаратов из композиционных материалов / Я. С. Карпов // Технологические системы. – К., 2000. – Вып. 3. – С. 36 – 40. 12. *Сироткин О. С.* Технология и механика соединений / О. С. Сироткин, В. Б. Литвинов, В. И. Гришин. – М.: Арктика, 2000. – 314 с. 13. *Niu M. C.* Composite Airframe structures / M. C. Niu. – Hong Kong : Conmil Press Ltd., 1992. – 686 p. 14. *Матвиенко В. А.* Анализ современного уровня и перспектив конструктивно-технологического совершенствования соединений полимерных композиционных материалов / В. А. Матвиенко // Материалы совещания – М.: ИИАТ, 1986. – с. 3-12. 15. *Карпов, Я. С.* Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов [Текст] / Я. С. Карпов, С. П. Кривенда. – Харьков: ХАИ. – 128 с.

Bibliography (transliterated): : 1. *Anur'ev V. I.* Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja / V. I. Anur'ev. – M. Mashinostroenie, 2001. 2. *Artjuhin Ju. P.* Naprjazhenija v kleevyh soedinenijah / Ju. P. Artjuhin // Issledovanija po teorii plastin i obolochek. – Kiev: Izd-vo Kiev. gos. un-ta, 1973. – Vyp. 10. – S. 3 - 27. 3. *Baker A. A.* Composite Materials for Aircraft Structures / A. A. Baker. – Eurospan, 2004. – 400 p. 4. *Vereshhaka S. M.* Mehanika kompozicijnih materialiv: navchal'nij posibnik / M. Vereshhaka. – Sumi: Sums'kij derzhavnij universitet, 2013. – 160 s. 5. *Durao L. M.* Machining of hybrid composites : Ph.D. dissertation / L. M. Durao. – Porto, 2005. – 242 p. 6. *Krivoruchko D. V.* Mehanicheskaja obrabotka kompozicionnyh materialov pri sberke letatel'nyh apparatov (analiticheskij obzor): monografija / D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga, V. A. Kolesnik i dr.; pod obshhej red. prof. V. A. Zalogi. – Sumy: Universitetskaja kniga, 2013. 272s 7. *Ustjugov I. I.* Detali mashin. Uchebnoe posobie dlja uchashhihsja zaocnyh tehnikumov / I. I. Ustjugov – M.: Vysshaja shkola, 1973. – 472 s. 8. *Karpov Ja. S.* Soedinenija vysokonagruzhennyh detalej iz kompozicionnyh materialov. Soobsh. 1. Konstruktivno-tehnologicheskie reshenija i ocenka ih rabotosposobnosti / Ja. S. Karpov // Probl. prochnosti. – 2006. – № 3. – S. 23 – 33. 9. *Vorobej V. V.* Soedinenija konstrukcij iz kompozicionnyh materialov / V. V. Vorobej, O. S. Sirotkin. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 168 s. 10. *Karpov Ja. S.* Soedinenija detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov / Ja. S. Karpov. – H.: Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t», 2006. – 359 s. 11. *Karpov Ja. S.* Nauchnye osnovy reshenija problema soedinenija vysoko-nagruzhennyh detalej letatel'nyh apparatov iz kompozicionnyh materialov / Ja. S. Karpov // Tehnologicheskie sistemy. – K., 2000. – Vyp. 3. – S. 36 – 40. 12. *Sirotkin O. S.* Tehnologija i mehanika soedinenij / O. S. Sirotkin, V. B. Litvinov, V. I. Grishin. – M.: Arktika, 2000. – 314 s. 13. *Niu M. C.* Composite Airframe structures / M. C. Niu. – Hong Kong : Conmil Press Ltd., 1992. – 686 p. 14. *Matvienko V. A.* Analiz sovremennogo urovnja i perspektiv konstruktivno-tehnologicheskogo sovershenstvovanija soedinenij polimernyh kompozicionnyh materialov / V. A. Matvienko // Matepialy soveshhanija – M.: IIAТ, 1986. – s. 3-12. 15. *Karpov, Ja. S.* Proektirovanie i konstruirovanie soedinenij detalej iz kompozicionnyh materialov [Текст] / Ja. S. Karpov, S. P. Krivenda. – Har'kov: HAI. – 128 s.