

Олег Шаповалов, Євген Рашевський, В'ячеслав Кохан, Геннадій Болотов

## СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**Вступ.** Композиційні матеріали знаходять найбільш ефективне застосування в аерокосмічній техніці. Особливо швидкими темпами вони поширюються в галузі військової авіації. У літакобудуванні для цивільної авіації композити як основний матеріал поширювались значно повільніше, однак останнім часом і тут спостерігається значне прискорення.

**Постановка проблеми.** Із самого початку літальний апарат потребував для свого створення легких матеріалів. На початковому етапі у ролі таких матеріалів застосовували тканину, оброблену нітроцелюлозою, та фанеру. Суттєвим проривом стало застосування алюмінію, на основі якого почали будувати суцільнометалеві конструкції аеропланів. Друга половина минулого століття супроводжувалась розвитком та інтенсивним поширенням в авіації конструкційних матеріалів із принципово новими властивостями – композиційних матеріалів.

**Мета роботи.** Метою роботи є аналіз розвитку, сучасного стану та перспектив застосування композиційних матеріалів у літальних апаратах військового та цивільного призначення.

**Виклад основного матеріалу.** На першому етапі для виготовлення окремих елементів літаків, а також легких експериментальних апаратів застосовувались скловолокнисті пластики. У подальшому із розробкою композитів на основі борних волокон із високими механічними властивостями темпи їх застосування суттєво зросли.

Нині в авіакобудуванні застосовується широке різноманіття типів композиційних матеріалів на основі вуглецевих та борних волокон, арамідних та скловолокон, але найбільш перспективними вважають композити, у яких як зміцнююча арматура застосовуються волокна бору, карбиду бору та вуглецю, які в умовах підвищених температур здатні забезпечувати необхідну жорсткість конструкції при зниженні її маси на 20–40 %.

Завдяки постійному підвищенню експлуатаційних властивостей композиційних матеріалів неперервно зростає обсяги їх застосування в авіаційній техніці. Вже сьогодні у літаках, що проектуються, та перспективних конструкціях передбачається масова доля композитів на рівні 30–50 %, що суттєво впливатиме на вантажопідйомність і дальність польоту літака, витрати палива і загальний ККД.

**Висновки.** Найбільш перспективними композиційними матеріалами для літакобудування є армовані пластики на основі вуглецевих та борних волокон, а для гелікоптерів – арамідні волокна у суміші зі скловолокном.

**Ключові слова:** літальні апарати, композиційні матеріали, історія і перспективи застосування.

Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 7.

**Вступ.** Незважаючи на те, що застосування композитів в аерокосмічній техніці займає на сьогодні відносно незначну частку від їх загального обсягу споживання, композиційні матеріали знаходять найбільш ефективно застосування саме в цій галузі.

В аерокосмічній техніці вимоги звичайно вище, ніж у інших галузях застосування. У першу чергу це відноситься до таких важливих характеристик, як мала маса, висока міцність і жорсткість, необхідна стійкість до втомних напружень. Нині саме композити є конструкційними матеріалами з високими експлуатаційними характеристиками, що відповідають вказаним вимогам.

Застосування композиційних матеріалів в авіаційній техніці швидко поширюється [1], особливо в галузі військової авіації, де віддача від витрат найбільша. В літакобудуванні для цивільної авіації композити як основні конструкційні елементи поширювались значно повільніше, однак останнім часом їх застосування суттєво прискорилось. В аерокосмічній техніці, де маса має найбільше значення, композити застосовують як основний матеріал.

**Постановка проблеми.** Із самого початку літальний апарат потребував застосування легких матеріалів для свого створення. Крила найбільш ранніх літальних апаратів були обтягнені тканиною, обробленою нітроцелюлозою, а для конструкційних деталей застосовували фанеру, проклеєну фенольними смолами. Літак «Вега» фірми «Локхід», розроблений у 1923 р., був першим літальним апаратом, виконаним повністю з фанери із застосуванням процесу формування під тиском окремих деталей. На початку 20-х років фірма «Юнкерс» розробила суцільноалюмінієвий аероплан, однак така суцільнометалева конструкція стала загальноприйнятною не одразу. У роки Другої світової війни фанера ще залишалась основним конструкційним матеріалом для багатьох бойових літаків, зокрема таких, як англійського бомбардувальника «Москітоу», гідролітака фірми «Х'юз»

(США), радянського винищувача ЛАГГ-3. Водночас все ширше почали застосовуватись авіаційні конструкції на основі сталі та алюмінію. У той же час друга половина минулого століття супроводжувалась розвитком й інтенсивним поширенням у авіації конструкційних матеріалів із принципово новими властивостями – композиційних матеріалів.

**Мета роботи.** Метою роботи є аналіз розвитку, сучасного стану та перспектив застосування композиційних матеріалів у літальних апаратах військового та цивільного призначення.

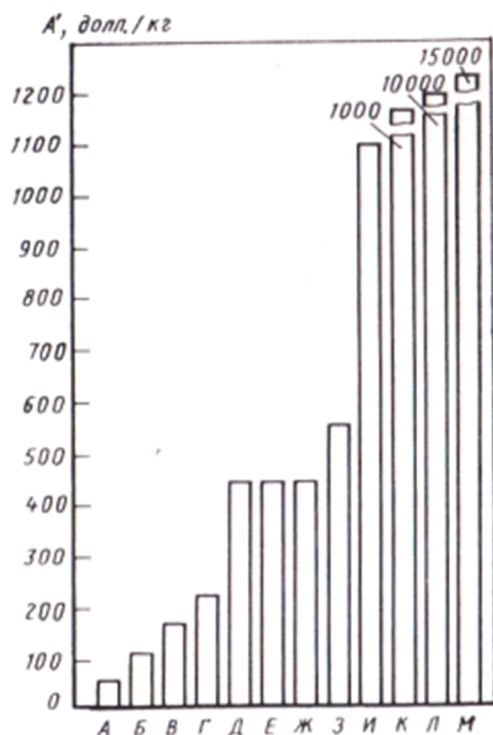
**Виклад основного матеріалу.** Літальні апарати військового призначення були першими, в яких композити, зокрема скловолокнисті композиційні матеріали (СВКМ) застосовувались у значних обсягах. Ще 24 березня 1944 року був вперше випробуваний літак ВТ-15 (США), у якого хвостова частина фюзеляжу була виконана з пластикових композитів. Однак проблеми надійності, низькі міцність і жорсткість при стисканні цих матеріалів обмежували їх застосування в літальних апаратах військового призначення, хоча вони були успішно застосовані у процесі виготовлення двох легких цивільних літальних апаратів «Пілер Кеб» та «Ігл 1» (рис. 1) фірми «Віндекер» (1969) [2].



Рис. 1. Суцільносклопластиковий літак «Ігл 1» фірми «Віндекер»

Швидке впровадження СВКМ в авіаційну техніку заснувало нову галузь – технологію композитних матеріалів. У 1966 р. із розробкою і впровадженням борних волокон інтерес до композитних конструкцій різко зростає. Нові композиційні матеріали із високими механічними властивостями разом із застосуванням нових комп'ютерних технологій проектування дозволили суттєво знизити запас міцності конструкцій до практично реальних величин, які призводять до оптимальної економії маси і зниження вартості.

Оскільки маса літального апарата оказує прямий вплив на його експлуатаційні показники – дальність польоту, корисне навантаження, витрати палива тощо, тому цю величину слід враховувати вже на початковому етапі розроблення. Ефективність розробок визначається фінансовою економією на кілограм зекономленої маси. Для малих цивільних літальних апаратів, які рідко літають з повним навантаженням або на граничні відстані, ця величина не може бути значною (рис. 2) [3]. Проте цей показник значно збільшується для набагато складніших літальних апаратів, таких як надзвукові транспортні літаки або літаки вертикального зльоту і посадки, у яких відношення корисного вантажу до маси літального апарату є визначальним.



- А– малі цивільні літаки;
- Б– гелікоптери;
- В– транспортні літаки;
- Г– цивільні комерційні літаки;
- Д– двигуни літальних апаратів;
- Е– літак «Боїнг-747»;
- Ж– літак-винищувач;
- З– літак вертикального або короткого зльоту і посадки;
- И– надзвуковий транспортний літак;
- К– супутник із навколоразомною орбітою;
- Л– супутник зі стаціонарною орбітою;
- М– космічний корабель «Шаттл»

Рис. 2. Економія маси A' для різних літальних апаратів

Для космічної техніки, де вартість на одиницю маси надзвичайно висока внаслідок значної кількості палива, необхідного для підйому ракети на космічну орбіту, економія вартості завдяки застосуванню композиційних матеріалів є дуже помітною (рис. 2).

У випадках, коли маса має вирішальне значення, слід відзначити, що скловолокнисті композити володіють питомою міцністю, яка у 5-6 разів перевищує питому міцність алюмінію – основного матеріалу, з яким звичайно здійснюють порівняння. У тих випадках, коли необхідна жорсткість, враховують, що епоксидні композити із застосуванням вуглецевого та борного волокон мають у п'ять разів більшу питому жорсткість, ніж алюміній. Найбільшу економію маси при задовільній жорсткості дає застосування гібридних композиційних матеріалів, наприклад, композитів на основі арамідного волокна у поєднанні з вуглецевим або скловолокном [4].

**Застосування композиційних матеріалів у військовій та цивільній авіації.** Перше широке застосування композиційних матеріалів в авіації було здійснене фірмою «Макдоннел» при виготовленні серії рулів повороту з епоксидно-бороволокнистого матеріалу для літака F-4, встановлених надалі на більшості літальних апаратів, що знаходяться на озброєнні армії США [5]. Першою виготовленою деталлю, розробленою спеціально з композита, був горизонтальний стабілізатор для літака F-14A, який мав трапецієвидну форму розмірами 2,5×2,5 м. Завдяки застосуванню борного волокна було зекономлено 83 кг маси. Такі стабілізатори застосовувались у літаках до 1970 року і ніяких проблем з їх експлуатацією та обслуговуванням не було виявлено. Найбільш широка програма застосування композиційних матеріалів на транспорті включала розробку елементів крила самого великого на той час транспортного літака С-5А «Гелаксі». У цьому випадку відмовились від застосування існуючої конструкції з алюмінію і розробили конструкцію цих елементів повністю з епоксидно-бороволокнистого пластика (рис. 3). Застосована конструкція забезпечила зниження маси на 22 %.

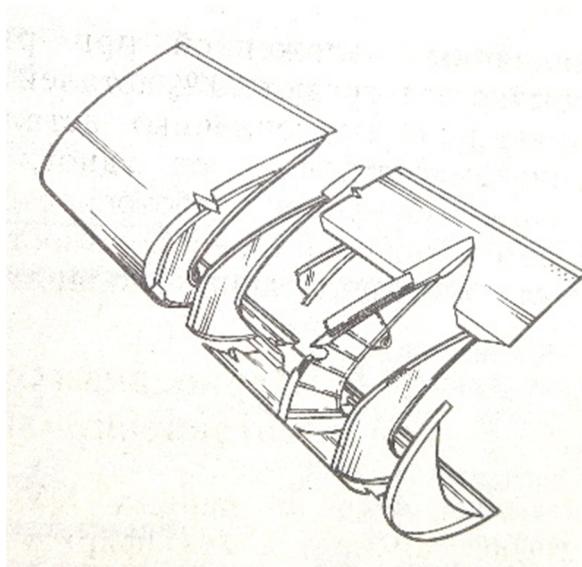


Рис. 3. Конструкція передкрилка з боропластика літака С-5А

Звичайне зниження маси при виробництві сучасних військових літальних апаратів складає 20 %, для перспективних літальних апаратів цивільної авіації – близько 25 %, для перспективних військових літальних апаратів – до 30–35 %. Водночас розробка нових матеріалів і технологій їх виготовлення і застосування призвела до зниження порівняно високої вартості компонентів з композитів для літальних та космічних апаратів, яка нині дорівнює вартості їх металевих аналогів або нижче її.

Успіхи, досягнені при застосуванні композиційних матеріалів у покращених конструкціях літальних апаратів, викликали прискорення розробки та виробництва нових композитів, що мають низьку вартість. Серед армуючих волокон, що отримали розвиток на початку 70-х років, були вуглецеві волокна та різні арамідні волокна типу «Кевлар», що мають високу жорсткість. Широке різноманіття конструкційних матеріалів на основі композитів надало розробникам певну волю для оптимізації конструкцій. Зокрема, якщо в конструкціях крил літальних апаратів на сьогодні застосовують зазвичай вуглецеві волокна і гібридну суміш вуглецевих та борних волокон, то в конструкціях гелікоптерів насамперед застосовують арамідні волокна та гібридну суміш арамідних та скловолокон (табл.).

Таблиця

Приклади розробок деталей гелікоптерів з композитів

Деталь або вузол гелікоптера	Епоксі-графіто-пластик	Епоксіскло-пластик	Епоксіорганопластик (на основі «Кевлара»)
Обтікач передачі, «Белл ІН - 1D»	+	–	–
Лопаті несучого гвинта, «Белл ІН – 1D»	–	+	+
Лопаті несучого гвинта, «Боїнг СН – 47С»	–	+	–
Лопаті хвостового гвинта, «Х'юз ОН – 6А»	–	–	+
Ступиця гвинта, «Сікорські СН – 54В»	–	+	–
Лопаті несучого та хвостового гвинтів, хвостове оперіння, «Сікорські S – 76»	–	–	+

Фірма «Сікорський» нині здійснює виробництво лопатей несучого та рульового гвинтів вертольотів із застосуванням лонжеронів з графітної смоли, оплетеної скловолокном або вуглецевим волокном. Зокрема, такі лопаті застосовуються на вертольотах «UH-60M Black Hawk», для яких наразі розробляється композитна хвостова балка зі

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

стабілізатором. Застосування на розповсюджених військових вертолітах «Boeing AH-64D Апачі Блок III» вуглецево-волокнистих (карбонових) лопатей замість титанових забезпечило зниження їх маси на 30 %.

Як свідчить наведений аналіз, у авіабудуванні застосовується широке різноманіття типів композиційних матеріалів, які передусім розрізняються видом зміцнюючих армуючих волокон. Однак, на думку зарубіжних спеціалістів, з погляду питомої міцності та питомої жорсткості найбільш перспективними є композиційні матеріали, у яких як зміцнююча арматура застосовуються волокна бора, карбіда бора та вуглецю, оскільки в умовах високих температур, що виникають при надзвуковому польоті, ці матеріали здатні забезпечувати необхідну жорсткість конструкції. До таких матеріалів відносять бороепоксидні композити – боропластики, вуглепластики, бороалюміній, які здатні витримувати температури до 453 К і забезпечують зниження маси на 20–40 %.

Ще у 1971 р. першим промисловим застосуванням конструкцій на основі епоксівуглеволоконного пластика був підкрильний обтікач літака F-111. Сьогодні як промислове застосування таких композиційних матеріалів можливо назвати гальмівний щиток літака F-15, обшивку вертикального стабілізатора та горизонтальний стабілізатор літака F-16. Ці вузли забезпечили покращені експлуатаційні показники і довговічність протягом тривалого терміну експлуатації.

Одна з найбільш вражаючих програм застосування композитів була створена за спільною ініціативою ВПС США та фірми «Грумман» у липні 1973 р. Метою цієї програми було виготовлення та випробування горизонтального стабілізатора з композита для стратегічного бомбардувальника B-1 [6]. Результат розробки цієї конструкції показаний на рис. 4. Як випливає з рис. 4, основу конструкції становить саме вуглепластик.

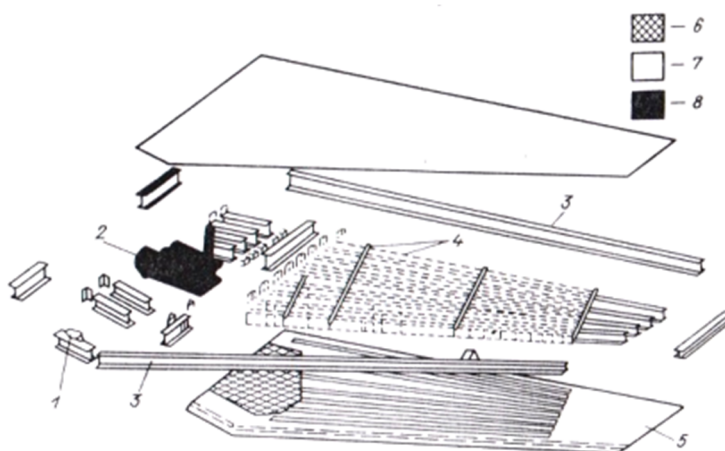


Рис. 5. Виготовлений з композита горизонтальний стабілізатор:

- 1 – вузол кріплення підйомника; 2 – несуча опора; 3 – швелерні лонжерони;  
4 – синусоїдальні лонжерони із нервюрами; 5 – нижня панель обшивки; 6 – епоксіборопластик;  
7 – вуглепластик типу A/S; 8 – титан

Цей стабілізатор має площу  $22,3 \text{ м}^2$ , довжину 9,1 м, із товщиною у основи близько 360 мм. Стабілізатор з композита розробляли таким чином, щоб зменшити кількість деталей при збиранні і тим самим знизити його вартість. Основну обшивку виготовили зі 106 шарів епоксівуглепластика. Стрічки з епоксіборопластика були введені у зовнішній шар для надання конструкції необхідної жорсткості по довжині деталей. Силовий набір стабілізатора складається з епоксівуглепластикових лонжеронів та нервюр. Реальна маса стабілізатора з композита на 227 кг нижче, ніж у аналогічній металевій конструкції. Це забезпечило сумарне зниження маси на 15 %. Сумарне зниження вартості стабілізатора з композиційних матеріалів становить 17,5 % у порівнянні з витратами на металевий стабілізатор.

Масова частка композиційних матеріалів у конструкційних деталях, як показано на рис. 5, неперервно зростає і літальний апарат майбутнього буде не менш, як наполовину складатись із композитів.

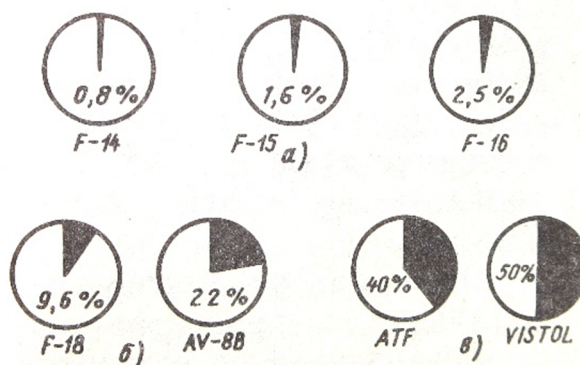
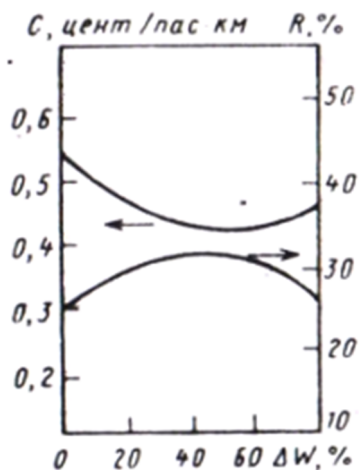


Рис. 5. Тенденція росту масової частки композитів в авіаційних конструкціях

Слід зазначити, що прогноз застосування композитів в авіації, наведений на рис. 6, був зроблений ще на початку 90-х років і нині він повністю підтвердився. Зокрема, проекти перспективних літаків ATF та VISTOL знайшли втілення у сучасних тактичних винищувачах ВПС США F-22 «Raptor» та F-35 «Lightning» відповідно. Слід відзначити, що з усіх композиційних матеріалів, застосованих у літаку F-22, 22 % припадає на вуглепластики.

Застосування композиційних матеріалів дозволило також здійснити суттєву модернізацію бойових літаків, що вже знаходяться у виробництві та експлуатації. Зокрема, розроблена і запущена у виробництво обшивка крил для літака F-18, що виготовляється для ВМС США. У вдосконаленому літаку AV-8B «Харрієр» масова частка композитів становить до 15 % у конструкції цього літака.

Конструкції на основі композиційних матеріалів для цивільної авіації почали застосовувати значно пізніше, ніж для військової. Спочатку дослідження проводили лише на малонавантажених конструкціях. Тривалі випробування показали, що деталі та вузли ефективні за своїм конструктивним рішенням, довговічні, добре обслуговуються та ремонтпридатні. Ці початкові дослідження в усіх випадках показали, що застосування композитів надає суттєві переваги. Результати дослідження взаємозв'язку процентної частки застосування композиту із прибутком на капіталовкладення та прямими витратами наведені на рис. 6, з якого випливає, що найбільш доцільною є об'ємна маса композитів в межах 50–60 % у конструкції літака [3].



$C$  – прямі операційні витрати у центрах на один пасажиро-кілометр;  $R$  – прибуток на вкладений капітал;  $\Delta W$  – частка композитів у масі літака

Рис. 6. Вплив застосування композитів на економічні параметри великого транспортного літака

Нині вміст композитів у конструкціях сучасних пасажирських літальних апаратів становить до 15 %. Зокрема, у серіях літаків фірми «Боїнг» В-757 та В-767 застосовуються епоксидноуглепластикові композити для рулів напрямку, висоти, елеронів та повітряних щитків. Для багатьох інших деталей успішно застосовані епоксіарамідні композити. У нових поколіннях цивільних літаків частка композитів суттєво зростає. Найбільш яскравим прикладом є Боїнг -787 «Dreamliner» (рис. 7). Більша частина деталей цього літака виготовлена з композиційних матеріалів, він має більш високий ККД у порівнянні із попередніми аналогами та більш низькі витрати палива.



Рис. 7. Літак фірми «Боїнг» В-787

У конструкціях російських літаків також широко застосовуються композиційні матеріали. Зокрема, у сучасному магістральному пасажирському лайнері ТУ-204 до 25 % деталей виготовлено з композитів (з них частка углепластиків становить 14 %). Частка застосування композитів у новому магістральному літаку МС-21, який на сьогодні знаходиться у стадії розробки, буде становити 35–37 % [7].

Серед перших сучасних вітчизняних транспортних літаків, що виготовляються із застосуванням композиційних матеріалів, слід відзначити АН-72, випуск якого здійснюється на Харківському авіазаводі.

#### **Висновки.**

1. Застосування композиційних матеріалів в авіабудуванні радикально дозволяє підвищити міцність, надійність, безпеку та інші експлуатаційні характеристики повітряних суден з одночасним зниженням їхньої маси та витрат пального.

2. Найбільш перспективними композиційними матеріалами для літакобудування слід вважати армовані пластики на основі вуглецевих та борних волокон, а для гелікоптерів – на основі арамідного волокна та його суміші із вуглецевим або скловолокном.

#### **Список використаних джерел**

1. *Application of Composites // Composites*. – 1988. – Vol. 19, № 2. – P. 91.
2. *Lubin G. Handbook of Fiberglass and and Advanced Plastics Composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1969.
3. *Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина*. – М. : Машиностроение, 1988. – 584 с.
4. *Композиционные материалы: справочник / под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского*. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
5. *Handcock R.N. The Application of Advanced Composites to Military Aircraft / 10th ICAS Congress, Ottawa, Canada, October 3, 1978*.
6. *Ludwig W., Erdacher H., Lubin G. Composite Horizontal Stabilizer for the B-1. SPI Reinforced Plastics /Composites Institute, 32nd Annual Conference, 1977*.
7. *Солошенко В. Композиты в авиационной промышленности. Опыт применения [Электронный ресурс] / В. Солошенко // Линия полета*. – 2013. – № 82. – Режим доступа : <http://www.spblp.ru/ru/magazine/82/183>.

## References

1. Application of Composites (1988). *Composites*, Vol. 19, № 2, p. 91.
2. Lubin, G. (1969). *Handbook of Fiberglass and and Advanced Plastics Composites*, Van Nostrand Reinhold, New York.
3. Lyubin, Dzh. (ed.) (1988). *Spravochnik po kompozitsionnym materialam [Reference book on composition materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
4. Vasilev, V.V., Tarnopolskii, Yu.M. (eds.) (1990). *Kompozitsionnyye materialy: spravochnik [Composition materials. Reference book]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
5. Handcock, R.N. (1978). *The Application of Advanced Composites to Military Aircraft*. 10th ICAS Congress, Ottawa, Canada, October 3.
6. Ludwig W., Erdacher H., Lubin G. (1977). *Composite Horizontal Stabilizer for the B-1*. SPI Reinforced Plastics / Composites Institute, 32nd Annual Conference.
7. Soloshenko, V. (2013). *Kompozity v aviastroenii. Opyt primeneniia [Composites in the aircraft industry. Experience of application]*. *Liniia poleta – Flight Line*, № 82. Retrieved from <http://www.spblp.ru/ru/magazine/82/183>.

UDC 629.7.02

Oleg Shapovalov, Eygen Rashevskiy, Vyacheslav Kokhan, Gennadyi Bolotov

### CONDITION AND PROSPECTS FOR THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT FOR MILITARY AND CIVILIAN USE

**Introduction.** Composite materials find the most effective application in aerospace engineering. They are spreading particularly rapidly in the field of military aviation. In the aircraft industry for civil aviation, composites as basic materials were much slower, but there has been a significant acceleration in recent years.

**Formulation of the problem.** From the very beginning, the aircraft required light materials for its creation. At the initial stage, such materials were used for fabric treated with nitrocellulose and plywood. A significant breakthrough was the use of aluminum, on the basis of which they began to build all-metal constructions of airplanes. The second half of the last century was accompanied by the development and intensive distribution in aviation of structural materials with fundamentally new properties - composite materials.

**Objective.** The purpose of the work is to analyze the development, current state and prospects of application of composite materials in military and civil aircraft.

**Statement of the main material.** At the first stage, glass-fiber plastics were used to produce individual elements of aircraft, as well as light experimental devices. In the future, with the development of composites based on boron fibers with high mechanical properties, the rate of their application has grown significantly.

At present, a wide variety of types of composite materials based on carbon and boron fibers, aramid and glass fibers is used in aircraft building, but composites that use boron, boron and carbon fibers as reinforcing fittings that can provide the necessary rigidity of the structure with a reduction in its mass by 20-40 %.

Due to the constant increase in the performance properties of composite materials, the volume of their use in aviation equipment is continuously increasing. Already at present, in the projected aircraft and promising designs, the mass fraction of composites is assumed to be at the level of 30-50 %, which significantly affects the cargo carrying capacity and range of the aircraft, fuel consumption and overall efficiency.

**Conclusions.** The most promising composite materials for aircraft construction are reinforced plastics based on carbon and boron fibers, and for helicopters, aramid fibers in a mixture with glass fiber.

**Key words:** aircraft; composite materials; history and prospects of application.

Fig.: 7. Tab.: 1. Bibl.: 7.

УДК 629.7.02

Олег Шаповалов, Евгений Рашевский, Вячеслав Кохан, Геннадий Болотов

### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Приведена история применения композиционных материалов в авиационной технике, начиная с середины прошлого столетия. Приведены основные типы композитов, которые эффективно используются авиационной отраслью в настоящее время, их массовая доля в современных и перспективных летательных аппаратах.

**Ключевые слова:** летательные аппараты; композиционные материалы; история и перспективы применения.

Рис.: 7. Табл.: 1. Библи.: 7.



**Шаповалов Олег Леонідович** – начальник відділу, Державний науково-випробувальний центр Збройних сил України (вул. Стрільська, 1, 14003, м. Чернігів, Україна).

**Шаповалов Олег Леонидович** – начальник отдела, Государственный научно-испытательный центр Вооруженных сил Украины (ул. Стрелецкая, 1, 14003, г. Чернигов, Украина).

**Shapovalov Oleg** – Chief of department, State scientifically-proof-of-concept center of Armed forces of Ukraine (1 Shooter Str., 14003 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** ak1149cv@ukr.net

**Рашевський Євген Юрійович** – начальник відділення, Державний науково-випробувальний центр Збройних сил України (вул. Стрільська, 1, 14003, м. Чернігів, Україна).

**Рашевский Евгений Юрьевич** – начальник отделения, Государственный научно-испытательный центр Вооруженных сил Украины (ул. Стрелецкая, 1, 14003, г. Чернигов, Украина).

**Rashevskiy Eugen** – Chief of separation, State scientifically-proof-of-concept center of Armed forces of Ukraine (1 Shooter Str., 14003 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** reyu69@i.ua

**Кохан Вячеслав Володимирович** – помічник провідного інженера-випробувача, Державний науково-випробувальний центр Збройних сил України (вул. Стрільська, 1, 14003, м. Чернігів, Україна).

**Кохан Вячеслав Владимирович** – помощник ведущего инженера-испытателя, Государственный научно-испытательный центр Вооруженных сил Украины (ул. Стрелецкая, 1, 14003, г. Чернигов, Украина).

**Kokhan Vyacheslav** – Assistant Lead Test Engineer, State scientifically-proof-of-concept center of Armed forces of Ukraine (1 Shooter Str., 14003 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** khnvcslv@gmail.com

**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 Gennadyi** – 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>