

## НАДІЙНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ ТА МЕТАЛОКОМПОЗИТНИХ ГАЗОВИХ БАЛОНІВ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ І СІЛЬГОСПТЕХНІКИ

**І. В. Верещака**, ст. викладач, Сумський національний аграрний університет,

*На основі модифікованого поліноміального критерію міцності для багат шарових тонкостінних елементів, який містить граничні характеристики шару на поперечний зсув і трансверсальне обтиснення (відрив), розроблена методика оцінки граничного стану композитних і металокомпозитних (комбінованих) газових балонів високого тиску. Порівняння склопластикових і комбінованих балонів за їх граничним станом доводить, що останні мають ряд переваг – вони менш деформативні, більш надійні в експлуатації та вирають у плані теплоізоляційних властивостей. Уводзячи м'який заповнювач між внутрішньою частиною й обшивкою, вдається досягти умов рівномірної роботи матеріалу такої конструкції.*

**Ключові слова:** міцність, надійність, газовий балон, композиційний матеріал.

**Постановка проблеми.** Відомо, що близько 70% усіх шкідливих викидів в атмосферу припадає на частку автомобільного транспорту. Статистика свідчить, зокрема, про те, що у великих містах хронічна захворюваність, викликана забрудненням атмосфери, в 2, 4 рази вище, чим в інших населених пунктах. Тому розвинені країни, що зіштовхнулися із проблемою навколишнього середовища, провели екологізацію автотранспорту. Одним з найбільш ефективних способів поліпшення екологічних умов є застосування альтернативного автомобільного палива – стислого природного газу. Його використання замість рідкого моторного палива, крім того, дозволяє значно зменшити транспортні витрати. Це особливо важливо в умовах сільськогосподарського виробництва, тому що з переустаткуванням сільськогосподарської техніки на газ досягається зниження собівартості продукції.

Розв'язання питань надійності й технологічності виготовлення балонів високого тиску для різних галузей машинобудування, зниження їх питомої маси й габаритів, як і раніше, залишається важливим завданням. Один із підходів до його вирішення – застосування металокомпозитних (комбінованих балонів). Поєднання жорсткої металевої оболонки та оболонки, виготовленої методом намотування високоміцних волокон (скляних, борних, вуглецевих), просочених епоксидним сполучником, дозволяє значно зменшити питому масу комбінованих балонів у порівнянні зі сталевими балонами.

вими балонами.

### Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Найбільш відповідальним елементом автомобільної апаратури, необхідної для перекладу автотранспортних засобів і сільгосптехніки на стислий природний газ, є газові балони високого тиску [1 – 3]. Саме відсутність балонів, що задовольняють цим вимогам, стримує розширення використання газу як моторного палива в Україні.

Під час роботи комбінованих балонів через істотну відмінність модулів пружності матеріалу одні шари оболонки, як правило, виявляються перевантаженими, інші недовантаженими. Крім того, склопластикові частини балона повинні бути покриті додатковим захисним шаром із високоміцного пластику або металу. Зазначені причини знижують надійність таких конструкцій, збільшують питому вагу балонів і ускладнюють технологію їх виготовлення. Під час створення конструкцій полегшених газових балонів особлива увага приділяється вибору їх оптимальної форми, що дозволяє в комбінації із застосуванням нових композиційних матеріалів виключити можливість появи значних згинальних деформацій стінок балона й забезпечує умову їх рівномірності [4 – 5].

Класифікацію циліндричних балонів високого тиску для зберігання природного газу дає міжнародний стандарт ISO 11439-2003 і ГОСТ Р 51753-2001 (табл.1).

Таблиця 1 – Класифікація балонів високого тиску для зберігання природного газу

|  |  |
|--|--|
| CNG-1 (СПГ-1)<br>(стиснений природний газ) | Суцільнометалеві, виготовлені з легованої або вуглецевої сталі безшовні балони   |
| CNG-2 (СПГ-2)                              | Металопластикові балони, які складаються з металевого лейнера та зовнішньої несучої оболонки з композиційного матеріалу                          |
| CNG-3 (СПГ-3)                              | Металопластикові балони, які складаються з металевого лейнера та зовнішньої несучої оболонки з композиційного матеріалу по всій поверхні лейнера |
| CNG-4 (СПГ-4)                              | Балони з композиційних матеріалів  |

Характеристики балонів визначають сфери їх застосування. Виробництво композитного балона є технологічним і трудомістким, що обґрунтовує його застосування саме для зберігання стиснених газів під високим тиском в експлуатаційних умовах. У світі композитні балони можуть

замінити суцільнометалеві практично у всіх сферах, де припускається зберігання газу під високим тиском. Вибір типу балона споживачем визначається не тільки ціновими міркуваннями, але й обмеженнями за масою балонів, стійкістю до ударів, газонепроникністю, циклічною довговічністю.

стю і т.д. Додатково вводяться обмеження, що враховують сумісність матеріалу посудини із технічним газом, що його заповнює. Такі застереження містяться в міжнародних стандартах: з металами – в EN ISO 11114-1, з композиційними матеріалами – в EN ISO 11114-2 і EN ISO 11114-3.

Основна перевага балонів, що виготовлені із застосуванням композиційних матеріалів, – менша маса. Питома вага балона 2-го типу в порівнянні з питомою вагою суцільнометалевого балона знижується в 2-3 рази. Однак через високу вартість склопластику й трудомістку технологію виготовлення вартість таких балонів вища, а термін служби менший у зв'язку зі зменшенням

згодом конструктивної міцності обплетення [6 – 7].

За даними інформаційного бюлетеня Національної газомоторної асоціації Росії частка циліндричних металопластикових балонів з армованою оболонкою по всій поверхні порівняно невелика і, як правило, припадає на ринки технологічно розвинених країн. Також потрібно звернути увагу на співвідношення питомої маси й ціни за літр: металопластикові балони з армованою оболонкою по всій поверхні мають майже оптимальне співвідношення ціна-якість (табл. 2). Потрібно зазначити, що сталеві безшовні циліндричні газові балони (СПГ-1) домінують в існуючому газобалонному парку.

Таблиця 2 – Балони високого тиску

| Тип балона                               | Питома маса, кг/л | Ціна, US \$/л | Частка на ринку, % |
|--|-------------------|---------------|--------------------|
| СПГ-1, суцільнометалеві                  | 0,9               | 3 - 5         | 90                 |
| СПГ-2, металопластикові                  | 0,7 - 0,9         | 5 - 7         | 4                  |
| СПГ-3, металопластикові                  | 0,6 - 0,9         | 9 - 14        | 1                  |
| СПГ-4, балони з композиційних матеріалів | 0,3 - 0,5         | 11 - 18       | 3                  |

*- опис по ISO 11439-2003*

Відомо, що для постачання паливом одного двигуна внутрішнього згорання потрібно від 2 – 3 балонів для легкових автомобілів і більше 10 для вантажних автомобілів, тракторів або тепловозів. Габарити існуючих транспортних засобів обмежують розміри балонів. Крім того, газові балони помітно знижують вантажопідйомність автомобілів і вимагають тим більших витрат палива на власне перевезення, чим вони масивніші. При цьому вони працюють в умовах циклічних термо-механічних навантажень.

У зв'язку з цим створення нових конструкцій газових балонів простими й високотехнологічними способами із сучасних матеріалів, як і раніше, залишається актуальним завданням. Найбільш очевидний шлях удосконалювання – зменшення кількості металу в конструкції балона шляхом заміни його альтернативними матеріалами із кращими конструктивними характеристиками.

Металопластикові балони високого тиску з армованою оболонкою по циліндричній частині – наступний крок до вирішення проблеми виробництва економічних, простих у виготовленні й надійних посудин високого тиску. Така проблема вирішується шляхом застосування комбінованих балонів, у яких герметична металева оболонка поєднується із силовою оболонкою з композиційних матеріалів. Крім того, у конструкцію балона можуть вводитися додаткові шари, що виконують захисну й інші функції. Таким чином, балон утворюється з'єднанням шарів з різним функціональним призначенням. Ці шари, виконуючи кожний свою функцію, спільно надають балону необхідний комплекс властивостей (рис. 1).

Фірма FABER Industrie (Італія) упродовж багатьох років виготовляє сталеві й металопластикові балони. Остання розробка фірми – балони

другого типу з використанням вуглецевих волокон. Заміна склопластику на вуглепластик дозволила знизити масу балона в середньому на 16%.



Рисунок 1 – Типова конструкція металопластикового балона високого тиску з армованою по циліндричній частині оболонкою (СПГ-2)

Комбінований балон СПГ-2 складається із внутрішньої металевої герметичної оболонки, яка посилена шарами армованого матеріалу з позовжнім і кільцевим розташуванням волокон. Недоліком такої конструкції балона є значні труднощі під час його виготовлення. В основному це проблеми, які виникають при виготовленні напівсферичних частин днищ балона. Крім того, можливе руйнування або часткове пошкодження зовнішнього кільцевого шару під час експлуатації балона зі зниженням несучої здатності балона в цілому. Його конструкція удосконалюється тим, що в багатошаровому балоні, який містить герметичну металеву оболонку й підсилювальну оболонку з композиційного матеріалу на основі скляних волокон (склопластикова оболонка), металева оболонка виготовляється із циліндричної труби. При цьому закінчення днищ мають підвищену товщи-

ну. Склопластикова оболонка включає шари, армовані волокнами в кільцевому напрямку по циліндричній частині балона. При цьому передбачається нанесення зверху армованої оболонки захисного шару пластику.

Така конструкція балона виключає необхідність у поздовжньому армуванні склопластикової оболонки. Осьове навантаження від поздовжніх зусиль сприймається циліндричною частиною металевої оболонки. Радіальні ж зусилля від тиску газу сприймаються кільцевою арматурою композитного матеріалу.

Виробництвом балонів високого тиску 2-го типу також займаються фірми: MCS Cylinder Systems (Німеччина); Орський машинобудівний завод (Росія); Компанія ЛЕМ (Росія); Котласький електромеханічний завод (Росія); Pressed Steel Tank (США); SCI (NGV Systems) (США); Luxfer Gas Cylinders (США).

Фірма DYNETEC Industries (Канада) - відомий виробник металопластикових балонів, конструкція яких містить лейнер з алюмінієвого сплаву та оболонку з вуглепластику по всій поверхні (тип СПГ-3) (рис. 2). Алюмінієвий лейнер виготовляється із трубної заготовки. Максимальний діаметр балонів, що випускаються фірмою, становив 406 мм. Останнім часом фірмою розроблений балон діаметром 520 мм.



Рисунок 2 – Типова конструкція металопластикового балона високого тиску з армуючою оболонкою всієї поверхні (СПГ-3)

У новій конструкції балона реалізовані такі нововведення: освоєне виробництво алюмінієвого лейнера з листового прокату й змінений режим його термічної обробки; використане спеціально розроблене фірмою Mitsubishi високомодульне вуглецеве волокно; застосована система заходів щодо захисту поверхні балона від ударів.

У результаті вдалося значно збільшити запас статичної й циклічної міцності балонів. Під час освоєння серійного виробництва балонів очікується зниження їх вартості. Виробництвом балонів високого тиску 3-го типу також займаються фірми: Raufoss (Норвегія); НПФ Шторм (Росія); SCI (NGV Systems) (США); Luxfer Gas Cylinders (США); Kokan Drum / Dynetec (Японія).

Фірма Lincoln Composites (США) є світовим лідером у виробництві композитних балонів 4-го типу (СПГ-4). Фірма активно рекламує конструкцію балонів (рис. 3).

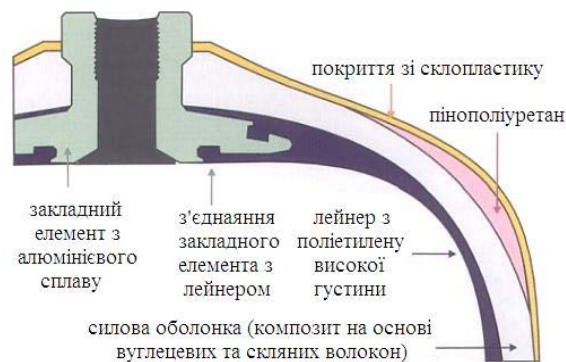


Рисунок 3 – Конструкція композитного балона високого тиску (СПГ-4) фірми Lincoln Composites (торговельна марка TUFFSHELL)

Виробництвом балонів високого тиску 4-го типу також займаються фірми: дочірнє відкрите акціонерне товариство «Оргенергогаз» (Росія); дослідне конструкторське бюро «Союз» (Росія); Quantum Technology (США); Ulitt (Франція); Composite Aquitaine (Франція).

Суцільнометалеві балони першого типу російського виробництва з вуглецевої сталі майже удвічі важчі балонів, що випускаються в Європі й Південній Америці. Балони третього й четвертого типів також важчі закордонних аналогів унаслідок використання скляних волокон, тоді як у комбінації з легким лейнером з алюмінію або полімерного матеріалу доцільно використовувати органічно-або вуглепластики.

Відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 11439-2003 розрахунковий тиск руйнування балонів, що виготовляються з використанням полімерних композиційних матеріалів, визначається на основі аналізу напружень, що діють у волокні. Для балонів на основі органічних і скляних волокон вимога щодо запасу міцності зростає в міру збільшення частки композита в конструкції. Тільки для балонів на основі вуглецевих волокон вимога щодо запасу міцності практично постійна для всіх типів конструкцій, виключаючи суцільнометалеві балони.

**Мета статті.** Показати доцільність використання склопластику в якості матеріалу газових балонів високого тиску. Проаналізувати переваги і недоліки різних конструкцій складових елементів газових балонів. Надати висновок щодо міцності конструкції від дії статичних навантажень і дослідити вплив структури металокомпозитних балонів на міцність та граничний стан.

**Результати досліджень.** Розрахунки балонів із композиційних матеріалів нерозривно пов'язані з конструктивними схемами й схемами армування, у яких композит працює тільки в напрямку розташування волокон. Це дозволяє щонайкраще реалізувати питомі характеристики

матеріалів, а відступ від оптимальних параметрів суттєво знижує несучу здатність. Особливістю проектування є неможливість чіткого визначення конструктивної форми й геометричних параметрів оболонки при заданих механічних характеристиках матеріалу внаслідок залежності властивостей матеріалу від структурних параметрів (кутів армування, співвідношення шарів і т.д.). Крім того, армований матеріал утворюється в процесі виготовлення самого балона й, отже, його властивості залежать від параметрів технологічного процесу. Метод безперервного намотування джгутом або стрічкою композита накладає обмеження на схеми армування, тобто в процесі проектування потрібно врахувати технологію виготовлення.

Огляд розрахункових моделей та методів розрахунків на міцність та граничний стан тонкостінних конструкцій багат шарової структури з анізотропних матеріалів викладені в [8]. Зазначається, що оскільки руйнування композитних оболонок обертання унаслідок слабкого опору деформаціям поперечному відриву й міжшарового зсуву відбувається задовго до досягнення напруженнями граничних значень. Під час дії навантаження, внаслідок особливостей технологічного характеру й фізико-механічних властивостей армованих пластиків, на поверхнях контакту сполучених шарів відбувається утворення тонких неоднорідних міжфазних прошарків, різного роду недосконалостей, наприклад ділянок відшарування або непроклею. У цьому разі припущення про неперервність переміщень і напружень при переході через поверхню контакту може бути суттєво порушеним.

Моделювання ділянок послабленого контакту на міжфазних поверхнях проводиться на основі дискретно-структурної теорії тонких пластин і оболонок. Розв'язання контактної задачі сполучення жорстких анізотропних шарів може бути подане двома розрахунковими моделями. Згідно з першою моделлю [8], контакт жорстких шарів здійснюється за допомогою клейового прошарку ненульової товщини. Для другої моделі характерне виконання статичних умов контакту по поверхні сполучення окремих шарів. Вважається, що напруження поперечного зсуву й обтискання на поверхні контакту рівні між собою.

За об'єкт дослідження обраний складається із циліндричної частини довжиною  $L = 2,163$  м й радіуса  $R = 0,188$  м, а також днищ, виконаних у вигляді півсфер. Корисний об'єм балона дорівнює  $V = 0,2$  м<sup>3</sup>. Оболонка виготовляється методом намотування односпрямованої склострічки з такими характеристиками:  $E_1 = 5,48 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = 1,25 \cdot 10^4$  МПа,  $E_3 = 1,43 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu_{12} = 0,058$ ,  $\nu_{13} = 0,394$ ,  $\nu_{23} = 0,394$ ,  $G_{12} = 3,925 \cdot 10^3$  МПа,

$G_{23} = 2,683 \cdot 10^3$  МПа,  $G_{13} = 4,293 \cdot 10^3$  МПа. У цілому такий балон містить двадцять односпрямованих шарів, дванадцять із яких намотуються в кільцевому напрямку й вісім – перехресно армованих спіральних шарів. Кут намотування спіральних шарів становить  $\pm 24^\circ$ . Товщина шару становить  $\delta = 0,0005$  м. За допомогою методики, наданої в роботі [8], визначалися технічні сталі всього пакета шарів склопластику як композиційного матеріалу з однією площиною пружної симетрії:

$$\begin{aligned} E_1 &= 2,36 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \\ E_2 &= 3,75 \cdot 10^4 \text{ МПа}, & E_3 &= 1,55 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \\ \nu_{12} &= 0,092, & \nu_{13} &= 0,367, & \nu_{23} &= 0,352, \\ G_{12} &= 6,7 \cdot 10^3 \text{ МПа}, & G_{23} &= 3,76 \cdot 10^3 \text{ МПа}, \\ G_{13} &= 3,22 \cdot 10^3 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Під час дослідження несучої здатності балона розглядалося два етапи руйнування армованої оболонки. На першому етапі визначалася величина тиску, коли відбувається руйнування в'язучого матеріалу. Для цього використовувався модифікований поліноміальний критерій міцності [8], який використовується для об'ємного напруженого стану і містить поперечні дотичні  $\sigma_{i3}$  ( $i=1,2$ ) і трансверсальні напруження  $\sigma_{33}$ . Для розглянутої структури склопластику були прийняті такі значення граничних характеристик міцності матеріалу:  $\sigma_{11}^+ = 290$  МПа,  $\sigma_{22}^+ = 490$  МПа,  $\sigma_{11}^- = 200$  МПа,  $\sigma_{22}^- = 290$  МПа,  $\sigma_{33}^+ = 50$  МПа,  $\sigma_{33}^- = 100$  МПа,  $\sigma_{12}^+ = 110$  МПа,  $\sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^+ = 35$  МПа. Руйнування в'язучого матеріалу відбувалося в точках серединної поверхні при тиску  $q_1^* = 16$  МПа. Подальші розрахунки несучої здатності балона за граничним станом виконувалися на основі другої розрахункової моделі оболонки. На другому етапі фіксувався граничний тиск  $q_2^* = 23$  МПа, при якому відбувалося руйнування склопластику в точках внутрішньої поверхні циліндричної оболонки. При цьому використовувався критерій міцності для випадку плоского напруженого стану в точці.

Розглядається пружне тіло, що перебуває під дією внутрішнього тиску інтенсивністю  $q = 20$  МПа. У цілому балон складається із двох частин: внутрішня частина – зі склопластику, зовнішня – металева. Внутрішня несуча частина балона абсолютно ідентична розглянутій раніше склопластиковій оболонці. Металева частина товщиною 0,004 м виконана з дюралюмінію В-95:  $E = 70000$  МПа,  $\nu = 0,3$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 500$  МПа. Задача розв'язується у вісесиметричній постановці. Балон розглядається як оболонка обертання.

Для виключення контакту склопластикової

оболонки з металевою обшивкою передбачений зазор із мінімальним розміром  $h_3 = 0,002$  м, який заповнюється ізотропним м'яким матеріалом низької щільності, наприклад, піновінілпластом із такими технічними параметрами:  $E = 83$  МПа,  $\nu = 0,33$ . Деформації несучої склопластикової оболонки в поздовжньому напрямку знижуються: якщо абсолютне подовження склопластикової оболонки в поздовжньому напрямку при тиску  $q = 20$  МПа становило  $\Delta l = 1,9 \cdot 10^{-2}$  м, то абсолютне подовження комбінованого балона дорівнювало  $\Delta l = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м. Зниження максимальних колових напружень склопластикової оболонки комбінованого балона в порівнянні з першим варіантом становило 40%.

Зі збільшенням інтенсивності внутрішнього тиску до  $q = 30$  МПа внутрішня склопластикована оболонка практично повністю передає навантаження на більш жорстку зовнішню металеву оболонку. Початок руйнування розглянутого варіанта комбінованого балона відбувався в зоні крайово-

го ефекту металевої обшивки при тиску  $q^* = 33$  МПа.

Для вибору оптимальної конструкції досліджуються два типи балонів із композиційних матеріалів (табл. 3). У цілому балон складається із двох частин: внутрішня частина – зі склопластику, зовнішня – металева. Комбіновані балони взаємно еквівалентні один одному за масою (№4 – №7, табл. 3). Товщина склопластикових оболонок становить  $h_1 = 0,0275$  м;  $h_2 = 0,033$  м для першого типорозміру й  $h_3 = 0,041$  м для другого. Технічні сталі всього пакета шарів склопластику як композиційного матеріалу з однією площиною пружної симетрії, а також матеріали металевої частини й заповнювача зазору вказані раніше. Задача розв'язується у вісесиметричній постановці. Балон розглядається як оболонка обер-

Таблиця 3 – Конструкції двох типів балонів із композиційних матеріалів

| № типорозміру   | Довжина циліндричної частини, м | Зовнішній радіус циліндра й сфери $R$ , м | Товщина оболонки зі склопластику $h_c$ , м | Товщина зазору $h_3$ , м | Товщина обшивки балона $h_m$ , м | Маса виробу, кг |
|-----------------|---------------------------------|---|--|--------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 1               | 2,163                           | 0,188                                     | 0,0275                                     | 0                        | 0                                | 160             |
| 2               | 2,163                           | 0,188                                     | 0,033                                      | 0                        | 0                                | 188             |
| 3 <sup>*)</sup> | 0,886                           | 0,257                                     | 0,041                                      | 0                        | 0                                | 175             |
| 4               | 2,163                           | 0,188                                     | 0,02                                       | 0,002                    | 0,004                            | 154,5           |
| 5               | 2,163                           | 0,188                                     | 0,02                                       | 0,004                    | 0,004                            | 160             |
| 6               | 0,886                           | 0,257                                     | 0,035                                      | 0,004                    | 0,004                            | 180             |
| 7               | 0,886                           | 0,257                                     | 0,03                                       | 0,004                    | 0,006                            | 165             |

<sup>\*)</sup> – продукція ВАТ «Казанське дослідне конструкторське бюро "СОЮЗ"» (Сертифікат відповідності вимогам ISO 9001-2001 № 00107/RU від 19.01.04 р.).

Під час дослідження несучої здатності балона розглядалися два етапи руйнування армованої оболонки. На першому етапі визначалася величина тиску, коли відбувається руйнування в'язучого. Для цього використовувалася модифікований поліноміальний критерій міцності, що містить поперечні дотичні  $\sigma_{i3}$  ( $i = 1, 2$ ) й трансверсальні напруження  $\sigma_{33}$ .

Коефіцієнти поліноміального критерія міцності визначаються з використанням експериментально встановлених граничних характеристик міцності  $\sigma_{ij}^+$ ,  $\sigma_{ij}^-$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ). Індекс «+» означає, що даний компонент – граничне напруження при розтяганні, індексом «-» позначене граничне напруження при стисканні. При цьому вважається, що міцність матеріалу на зсув не залежить від знака граничних значень дотичних напружень  $\sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+$  і поперечних дотичних напружень, тобто  $\sigma_{13}^+ = \sigma_{13}^-$ ,  $\sigma_{23}^+ = \sigma_{23}^-$ .

Для розглянутої структури склопластику були прийняті такі значення граничних характеристик міцності матеріалу:  $\sigma_{11}^+ = 290$  МПа,  $\sigma_{22}^+ = 490$  МПа,  $\sigma_{11}^- = 250$  МПа,  $\sigma_{22}^- = 390$  МПа,  $\sigma_{33}^+ = 50$  МПа,  $\sigma_{33}^- = 150$  МПа,  $\sigma_{12}^+ = 110$  МПа,  $\sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^+ = 55$  МПа. Подальші розрахунки несучої здатності виконувалися на основі другої розрахункової моделі оболонки. На другому етапі фіксувався граничний тиск, при якому відбувалося руйнування склопластику в точках внутрішньої поверхні циліндричної оболонки. При цьому використовувалася критерій міцності для випадку плоского напруженого стану в точці.

Розрахункові значення внутрішнього тиску, при якому на першому етапі відбувається руйнування в'язучого склопластикової оболонки, а на другому етапі руйнування конструкції в цілому, наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Несуча здатність газових балонів

| № типорозміру | Тиск руйнування в'язучого матеріалу склопластику $p_1$ , МПа | Тиск руйнування волокон склопластику $p_2$ , МПа | Тиск руйнування металевої обшивки за III теорією міцності $p_{III}$ , МПа | Тиск руйнування металевої обшивки за IV теорією міцності $p_{IV}$ , МПа |
|---------------|--|--|---|---|
| 1             | 27,90±0,05   | 58,32±0,005                                      | -   | -   |
| 2             | 29,45±0,05   | 61,93±0,005                                      | -   | -   |
| 3             | 28,60±0,05   | 64,03±0,005                                      | -   | -   |
| 4             | 28,10±0,05   | 58,70±0,005                                      | 42,50±0,05  | 52,00±0,05  |
| 5             | 27,80±0,05   | 55,36±0,005                                      | 54,80±0,05  | 58,00±0,05  |
| 6             | 29,10±0,05   | 65,85±0,005                                      | 58,05±0,05  | 62,50±0,05  |
| 7             | 28,60±0,05   | 62,07±0,005                                      | 58,65±0,05  | 62,55±0,05  |

Величини осьового подовження розглянутих типів балонів подані в табл. 5. Зі збільшенням інтенсивності тиску внутрішня склопластикова оболонка (модуль пружності склопластику втричі нижчий за модуль пружності дюралюмінію) практично передає більшу частину навантаження на жорсткішу зовнішню металеву оболонку. Початок

руйнування розглянутого варіанта комбінованого балона відбувався в зоні крайового ефекту металевої обшивки. Теоретичне значення тиску, при якому відбувалося руйнування металевої обшивки, визначалося на основі третьої (гіпотеза найбільших дотичних напружень) і четвертої (гіпотеза Губера-Мізеса) теорій міцності.

Таблиця 5 – Осьове подовження балона

| № типорозміру | Осьове подовження балона, $\times 10^{-3}$ м |   |
|---------------|--|---|
|               | при робочому тиску 20 МПа                    | при тиску руйнування в'язучого матеріалу склопластику $p_1$ , МПа |
| 1             | 5,96262                                      | 8,33476   |
| 2             | 4,83020                                      | 7,12792   |
| 3             | 3,30364                                      | 4,72836   |
| 4             | 4,80960                                      | 6,77318   |
| 5             | 4,65378                                      | 6,48584   |
| 6             | 2,71664                                      | 3,95952   |
| 7             | 2,60558                                      | 3,73440   |

**Висновки.** Варіюючи жорсткістю склопластикової оболонки, а також уводячи м'який заповнювач між внутрішньою частиною та обшивкою, вдається досягти умов рівномірної роботи матеріалу такої конструкції (комбінований балон). Значні деформації несучої склопластикової оболонки в поздовжньому напрямку усуваються досить жорсткою вздовж осі балона металевою захисною оболонкою. Таким чином, порівняння

склопластикових і комбінованих балонів (табл. 4, 5) за їх граничним станом доводить, що останні мають ряд переваг – вони менш деформативні, більш надійні в експлуатації та виграють у плані теплоізоляційних властивостей. Уводячи м'який заповнювач між внутрішньою частиною й обшивкою, вдається досягти умов рівномірної роботи матеріалу такої конструкції.

#### Список використаної літератури:

1. Irani Roy S. Gases in the 21st century. Part 2: Compressed natural gas, CNG today's green fuel? / Irani Roy S. // Gas World. – 2008. – № 8. – P. 52.
2. Исследование восточных возможностей – все ещё есть пространство для манёвра // Gas World СНГ. – 2008. – № 2. – С. 16 – 18.
3. Виньков А. Поделить воздух глобально / А. Виньков, А. Юданов // Эксперт, № 36 (625), 15 сентября 2008.
4. Попова Л.А. Баллоны высокого давления для компримированного природного газа /Л.А. Попова, Е.Н. Пронин // Информационный бюллетень Национальной газомоторной ассоциации РФ, № 2, март 2000.
5. Осадчий Я.Г. Прочностная отработка металлокомпозитных баллонов высокого давления/ Я.Г. Осадчий, Е.Н. Крылов, Ю.И. Русинович, П.В. Кононов// Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 3. – С. 30.
6. Павлов Н.В. Создание автореципиентов для хранения, транспортирования и выдачи сжатого водорода/ Н.В. Павлов // Технические газы. – 2008. – № 2. – С. 43 – 47.
7. Рубан А.Г. Инновационное обеспечение лидерства на рынке газовых баллонов/ А.Г.Рубан // Технические газы. – 2008. – № 2. – С. 49 – 55.
8. Верещака С.М. Нелинейное деформирование и устойчивость многослойных элементов конструкций с дефектами структуры // Верещака С.М. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 286 с.

## **Верещака І.В. НАДЕЖНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ И МЕТАЛОКОМПОЗИТНЫХ ГАЗОВЫХ БАЛЛОНОВ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ**

На основе модифицированного полиномиального критерия прочности для многослойных тонкостенных элементов, который пределы прочности анизотропного материала слоя на поперечный сдвиг и трансверсальное обжатие (отрыв), разработана методика оценки предельного состояния композитных и металлокомпозитных (комбинированных) газовых баллонов высокого давления. Сравнение стеклопластиковых и комбинированных баллонов по их предельному состоянию доказывает, что последние имеют ряд преимуществ – они менее деформативны, более надежные в эксплуатации и выигрывают в плане теплоизоляционных свойств. Вводя мягкий наполнитель между внутренней частью и обшивкой, удастся достичь условий равнопрочной работы материала такой конструкции.

**Ключевые слова:** прочность, надежность, газовый баллон, композиционный материал.

## **I. V. Vereshchaka RELIABILITY AND METALCOMPOSITE COMPOSITE GAS CYLINDERS FOR AUTOMOTIVE VEHICLES CONSTANT AGRICULTURAL MACHINERY**

Based on modified polynomial strength criterion for layered, thin-walled elements, which limits the strength of the anisotropic material layer in the transverse shear and transverse compression (separation), methods for estimation of limit state of composite and metalcomposite (combined) gas cylinders high pressure. Comparison of fiberglass and composite cylinders for their limit state proves that the latter have several advantages – they are less deformation, more reliable in operation and benefit in terms of insulating properties. Introducing the soft filler between the inner part and the casing, it is possible to achieve the conditions of durable material this design.

**Key words:** durability, reliability, gas cylinder, composite material.

Стаття надійшла в редакцію: 04.10.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Гецович Є.М.

УДК 621.785

## **СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ БОРИДНИХ ПОКРИТТІВ ЛЕГОВАНИХ МІДДЮ ТА ХРОМОМ НА ІСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЯХ**

**О. П. Гапонова**, к.т.н., доц.;

**В. О. Охріменко**, студент

Сумський державний університет, Україна

В роботі поданий аналіз відомих методів отримання боридних покриттів, досліджень їх структури і властивостей. Представлені результати дослідження впливу складу борирувальної суміші на прикладі бороміднення та борохромування на структуру і властивості покриттів на сталях У8 та ХВГ. Встановлено, хром і мідь, зменшуючи твердість, знижують крихкість дифузійних шарів. Мідь, на відміну від хрому, сприяє дифузії бору вглиб сталі, що забезпечує формування щільних та рівномірних за товщиною покриттів.

**Ключові слова:** борирування, бороміднення, борохромування, дифузія, покриття, твердість, сталь.

### **Постановка проблеми в загальному вигляді.**

Підвищення стійкості деталей машин та інструментів за допомогою насичення поверхні металів та сплавів різними хімічними елементами є актуальною задачею сьогодення матеріалознавства. Хіміко-термічною обробкою (ХТО) виробам можна надати різних властивостей, яких об'ємним легуванням або неможливо (азотування, борирування), або економічно не вигідно (хромування і т. д.) досягти.

На даний час існуючі методи ХТО поділяють на 4 групи: насичення в твердих, рідких, газових середовищах та плазмі. Технологічний процес ХТО в твердих та рідких середовищах, в пастах можна проводити в повітряній (окиснювальній) і контрольованій атмосферах або у вакуумі.

Для досягнення найбільшої твердості та

зносостійкості увагу привертає борирування, якому можна піддавати будь-які марки залізовуглецевих сплавів. Борирування є одним із найвідоміших методів обробки поверхні, який може забезпечити високий комплекс фізико-механічних властивостей. Цей процес дозволяє отримати покриття з високою твердістю (1800...2000 НВ), зносостійкістю, корозійною стійкістю та жаростійкістю.

Процес зазвичай проводиться при температурі 900–950°C [1]. Використання високотемпературних методів ХТО, для покращення властивостей серцевини виробу потребують подальшої термічної обробки.

Промислове використання отримало борирування в порошкових сумішах, електролізне, в рідинах і в пастах.

Суміші для порошкового борирування зазвичай складаються із: порошоків бору (феробор,