

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СКЛОПЛАСТИКОВИХ, ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ТА ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГ

Б.В. Копей, Юй Шуанжуй, А.Б. Стефанишин

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: koreyb@ukr.net*

Вказано на можливість застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг при видобуванні нафти з глибоких свердловин та проведено оцінку їх характеристик та параметрів втомної міцності гібридних насосних штанг порівняно із склопластиковими насосними штангами при циклічному розтязі та згині. Отримані результати застосовуються для оцінки запасів міцності штангових колон і можуть бути використані для прогнозування ресурсу за багатоциклової втоми.

Ключові слова: склопластик, гібридна насосна штанга, циклічний розтяг, напруження, границя міцності, циклічний згин.

Указанна возможность применения углепластиковых и гибридных насосных штанг при добыче нефти из глубоких скважин и проведена оценка их механических характеристик и параметров усталостной прочности гибридных насосных штанг по сравнению с стеклопластиковыми насосными штангами при циклическом растяжении и изгибе. Полученные результаты представляют практический интерес для оценки запаса прочности штанговых колонн и могут быть использованы для прогнозирования ресурса по многоцикловой усталости.

Ключевые слова: стеклопластик, гибридная насосная штанга, циклическое растяжение, напряжение, предел прочности, циклический изгиб.

The prospects for the use of the carbon-plastic and hybrid sucker rods for the deep-well oil production are considered and the evaluation of the fatigue strength of hybrid sucker rods as compared with fiberglass rods during cyclic stretching and bending is conducted. The obtained results represent a practical interest for the rod columns strength assessment and can be used to predict the resource at the multi-cycle fatigue.

Key words: fiberglass, hybrid sucker rod, cyclic stretching, stress, ultimate strength, cyclic bending.

Вступ

Колони насосних штанг, які складаються зі сталі або склопластику, в даний час широко застосовуються в нафтовидобуванні. Сталеві штанги є важкими і схильні до втомного руйнування, корозії та корозії під напруженням. Скловолоконні штанги є легшими, але величина їх деформації при розтягуванні є набагато більшою, ніж сталевих, і, крім того, їх твикористання не рекомендується у місцях змінного стискування в перехідних зонах.

У цій роботі розглянуто застосування вуглецевого волокна для потенційного вирішення проблем видобування нафти. Вуглецеве волокно виготовляють шляхом контрольованого піролізу полімерного прекурсора. Матеріал з вуглецевого волокна володіє надзвичайно високою міцністю на розрив – аж до 6,2 ГПа, а також модулем пружності при розтягуванні, який досягає 830 ГПа. Вуглецеве волокно також має дуже низьку густину – 1380 кг/м³, тобто майже в 6 разів нижчу, ніж у сталі.

Вуглець виробляють з безперервних волокон, які збирають в прядки, подібно як джгути склопластику. Ці волокна є незалежними одне від одного і не піддаються такому явищу, як утворення тріщин, що є значною перевагою при дії циклічних навантажень. В результаті процесу піролізу вуглець під час реакції повністю переходить до свого елементарного стану, і, по суті, стає дуже стійким до корозії, яка зазвичай діє на штанги.

Насосні штанги розробляються для того, щоб забезпечити використання вуглецевого волокна в галузі видобування нафти за допомогою штангового глибинного насоса. Основний підхід до конструкції, включаючи з'єднувальні елементи, запозичили з перевірених конструкцій, які широко використовували в світовій практиці. Безліч пултрузійних вуглецевих волокон, просякнутих епоксидною смолою, формують структуру тіла стрижня.

Механізована експлуатація з використанням штангового свердловинного насоса забезпечує переважну більшість вітчизняного видобутку нафти і газу. Насосна штанга передає потужність відкачування від джерела (первинного двигуна) – до точки її застосування – штангового свердловинного насоса, який розташований у нижній частині колони насосно-компресорних труб.

На сьогодні широко використовують три основні типи насосних штанг. В насосних установках переважно використовують звичайні сталеві насосні штанги, зібрані на муфтах. Скловолоконні насосні штанги мають невеликий, проте зростаючий попит на ринку і знаходять застосування у багатьох найновіших свердловинних установках. Безперервні намотувані сталеві насосні штанги типу Согод були розроблені і почали з'являтися на ринку нещодавно, і попит на них зростає.

Проблеми, пов'язані з поточними рішеннями та постановка задачі досліджень

Насосні штанги є основною складовою установки, а тому їхня поломка призведе до збою всієї системи. Крім того, вони працюють в динамічному режимі, тобто перебувають у постійному прискореному русі. Вони також можуть функціонувати у суворих умовах з високими температурами, в присутності корозійно-активних речовин та за максимальних навантажень. Суцільні сталеві штанги відносно важкі – їхня маса без муфт може становити від 1,08 до 5,4 кг/м (за загальноприйнятими розмірами). Вага сталевих штанг перевищує вагу рідини, яку вона піднімає, у 2-3 рази. Сталь чутлива до корозії, зношування та тріщиноутворення від корозійної втоми. Скловолокнисті насосні штанги приблизно утричі легші за сталеві, краще переносять корозійну дію, проте їх модуль пружності складає 1/4 від сталевих, що викликає значне їх видовження при розтягу. Вони також мають структурну вразливість до напружень стискування за втрати стійкості. Безперервні сталеві штанги мають менше місць, де виникає багато поломок через втому металу, завдяки ліквідації муфт, проте проблеми ваги та чутливості до корозії залишаються. Крім того, суцільна сталева колона штанг потребує спеціального обладнання для підземного ремонту, що ускладнює спуско-підймальні операції.

Безпосереднім результатом усіх цих чинників є те, що відмови у роботі насосних штанг є головними причинами простоїв насосних установок. Існує можливість застосувати удосконалені матеріали в галузі використання насосних штанг для вирішення цих проблем.

В даній роботі на основі аналізу літератури та проведених в лабораторії ІФНТУНГ натурних експериментів здійснено порівняння характеристик сталевих, склопластикових, вуглеволокнистих та гібридних насосних штанг з метою підвищення ефективності їх експлуатації.

Особливості вуглецевих волокон

Вуглецеві волокна – це суцільна нитка з чистого кристалічного вуглецю, виготовленого з попереднього полімерного волокна, який термічно оброблений за спеціально контрольованими умовами часу, температури і напруження. Зазвичай волокно-попередник – це полікрилонітріл. Полімерне волокно піролізоване за температури приблизно від 1500 до 2000 °С у спеціальних умовах під спеціальним напруженням розтягом для кристалізації карбону у потрібному розташуванні атомів пакуванням. Після обробки типовий діаметр волокна складає 7 мікрон. Окремі волокна формуються суцільно, довжиною приблизно від 3000 до 6000 метрів. Ці окремі волокна у кількості від 30 до 80 тисяч об'єднуються у джгути, які скупчують і намотують на котушки. Карбонове волокно швидко переходить з окремих спеціальних торгових структур до головних виробничих процесів. На даний час 12 компаній у світі використовують

та працюють з 133 тоннами карбонового волокна на рік [2]. Крім використання у аерокосмічній галузі, карбонові волокна можуть широко застосовуватись у автомобілебудуванні [3].

Властивості вуглецевого волокна

У випадку застосування насосної штанги важливими властивостями вуглецевого волокна є його міцність, жорсткість та густина. Інші важливі властивості – це стійкість до корозії, зношування та опір втомі. Міцність вуглецевого волокна може сягти рівня 620 МПа (в порівнянні з 720 МПа для сталі). Оптимальним для вибору кращого матеріалу насосних штанг є поєднання властивостей міцності і жорсткості. Для розроблення початкових конструкцій вуглеволокнистих штанг обрали волокно з межею міцності 400 МПа. Модуль Юнга для вуглецевого волокна може змінюватися аж до $6\cdot 10^5$ МПа (порівняно з $2,1\cdot 10^5$ МПа для сталі). Високий модуль пружності загалом відповідає нижчій міцності, але вищій вартості. Для початкової конструкції штанги обрали волокно з модулем пружності $1,6\cdot 10^5$ МПа.

Частка ваги насосної штанги з вуглецевих волокон залежить від густини матеріалів, яку використовують у стрижні. Густина вуглецевих волокон – одна з найважливіших властивостей, особливо стосовно властивості їм міцності. Густина є досить послідовна у спектрі вуглецевих волокон – приблизно 1310 кг/м^3 порівняно з 7850 кг/м^3 для сталі. Враховуючи динамічну природу насосної штанги, відношення міцності до ваги вуглецевого волокна часто сягають величин, які у 15 разів більші, ніж у сталі. Зносостійкість вуглецевих волокон залежить від їх орієнтації, модуля Юнга та внутрішньої сили зсуву. Питома швидкість зношування під час експлуатації односпрямованого вуглецевого волокна є на два порядки нижчою, ніж у сталі по сталі, чи сталі по склопластику [4,5].

Вуглецеве волокно, будучи по суті елементарним вуглецем, несприйнятливим до корозії. Композит із епоксидною смолою залишається одним з найбільш хімічно стійких конструкційних матеріалів, які використовують сьогодні.

Епоксидно-композитна вуглецево-волоконна труба використовується в кислотнопереробних заводах, причому вуглецеве волокно є більш хімічно інертним, ніж скловолокно [6].

Стосовно опору втомі вуглецевих волокон, односпрямований матеріал може бути циклічно навантаженим приблизно на 90% від його початкової межі міцності при розтягуванні до 100 млн. циклів без руйнувань [7]. Це високий опір втомі пояснюють наявністю односпрямованого матеріалу в тілі штанги. Так, обрив одного вуглецевого волокна не призводить до зосередженого навантаження сусіднього волокна. У той же час тріщина або інший розрив в сталі створює нестабільну концентрацію напружень, сприяючи поширенню тріщини під дією кожного додаткового циклу навантаження, що зрештою призводить до руйнування стрижня.

Вуглецеві волокна і епоксидна пултрузія композиційного стрижня

Використовуючи чудові властивості вуглецевих волокон в структурі, їх слід поєднати з полімерною матрицею, щоб отримати потрібну форму. Для структурних елементів, таких як насосна штанга, довжина якої в сотні разів більша її діаметра, пултрузія є очевидним технологічним вибором. Пултрузія – це тривалий процес витягування волокна через ванну із смолою, а потім через підігріту плашку, щоб забезпечити розмірні складові структурних елементів. У готовій формі волокна вирівнюються в напрямку тягового зусилля та головної осі форми. Композиційні структури володіють властивостями композиційного матеріалу. У епоксидній матриці композиційні властивості нижчі, ніж властивості вуглецевого волокна. Тому використовують круглі штанги одиничного розміру, і укладають їх так, щоб досягти бажаної міцності. Таблиця 1 відображає характеристики окремого елемента штанги.

Таблиця 1 – Характеристики окремих стрижнів вуглепластикових штанг

Параметр	Значення
Діаметр	3,28 мм
Міцність на розрив	2,62 ГПа
Модуль пружності при розтягуванні	158 МПа
Густина	1350 кг/м ³

Конструкція вуглепластикових штанг

Конструкція, яка описана тут, називається «Векторною штангою» [1]. Вона складається з кількох штанг малого діаметру, з'єднаних зі стандартною сталеву головою. Довжина штанг - стандартна і придатна для робіт із вже існуючим обладнанням свердловини. Вуглепластикові стрижні малого діаметра прикріплені до сталевій головці шляхом злиття їх за допомогою клинового ефекту в конусі з епоксидної смоли. Навантаження розтягом на штанги спричиняє створення клинової сили, нормальної до осі окремої штанги, підсилюючи опір дії силам зсуву склеєного стрижня.

Кріплення стрижня до сталевій головці

Металевий кінець арматури зроблений з того самого матеріалу, що використовується і для сталевих насосних штанг. Сталева головка покрита гальванічним цинково-нікелевим покриттям для підвищення стійкості від корозії. За потреби встановлюють протектори-скребки, які монтують на штангах, використовуючи волокнисті заготовки, та відливають смолу під тиском. Незалежні прогини окремих стрижнів малого діаметра поглинають деформації штанги під дією згинальних моментів без значних стрижневих напружень між волокнами, що під дією стиску є значною проблемою в монолітних композитних штангах. На рисунку 1 зображено конструкцію «Векторних штанг».

Характеристики вуглепластикових штанг

«Векторні штанги» можуть бути чотирьох типорозмірів, які відповідають стандарту Американського нафтового інституту, специфікації 11V. До таблиці 2 зведено основні параметри штанг.

Порівняння характеристик штанг

Щоб побачити основні відмінності між «Векторною штангою» та іншими доступними технологіями, погляньте на таблицю 3, наведену нижче.

Порівняльний аналіз свердловини

Вищевказані параметри конструкції штангової колони були реалізовані у свердловині з використанням комп'ютерної програми версії: 3.62 компанії Тета Ойлфілд Сервіз Родстар – програми аналізу хвильового рівняння шляхом моделювання, розробленої для того, щоб показати одну з можливих переваг Векторних штанг для їх роботи в глибоких свердловинах.

В таблиці 4 описано їх переваги з можливістю додаткового видобутку нафти.

Цей метод моделювання використовували в багатьох свердловинах (рис. 2). Головний висновок – до свердловин, які глибші за 2400 м, можна застосовувати існуюче наземне обладнання.

Оптимізація вартості

Вартість вуглецевого волокна значно вища, ніж із склопластика чи сталі. Для того, щоб оцінити економічні інженерні характеристики вуг-

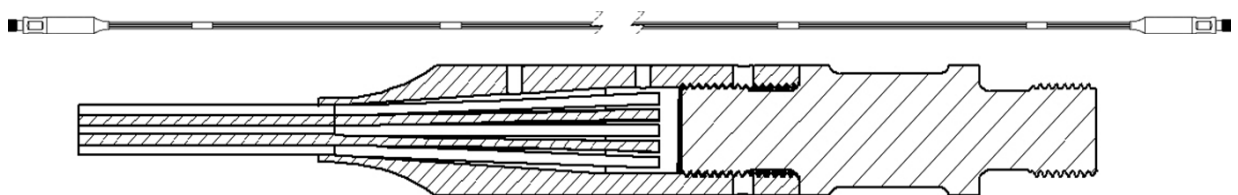


Рисунок 1 – Конструкція вуглеволоконистої штанги та вузол кріплення тіла до сталевій головці

Таблиця 2 – Основні параметри вуглепластикових штанг

Вуглепластикові насосні штанги									
		Номинальний розмір, дюйми/мм							
API 11V Стандартний розмір:		3/4 "	7/8 "	1 "	1-1 / 4 "				
		19,05 мм	22,225 мм	25,4 мм	31,75 мм				
Габаритні розміри									
Приведений діаметр тіла штанги	Дюйм мм	0,484 12,2936	0,563 14,3002	0,708 17,9832	0,786 19,9644				
Площа тіла штанги	Кв.дюйм мм ²	0,184 118,7094	0,249 160,6448	0,394 254,193	0,485 312,9026				
Діаметр пучка тіла штанги з коефіцієнтом заповнення 85%	Дюйм мм	0,525 13,335	0,611 15,5194	0,768 19,5072	0,853 21,6662				
Розмір ніпеля згідно з API	Дюйм мм	3/4 " 19,05	3/4 " 19,05	7/8 " 22,225	1 " 25,4				
Діаметр кінцівки з'єднання	Дюйм мм	1,5 38,1	1,5 38,1	1,625 41,275	2,0 50,8				
Технічні властивості									
Межа міцності при розтягуванні	МПа	1999,48							
Допустима сила, міцності при розтягуванні	МПа	1599,58							
Модуль пружності	ГПа	160,6							
Швидкість звуку в матеріалі	футів / сек м/с	10250 3124,2							
Константа пружності	in/lbf-ft x10 ⁻⁶ мм/Н·м	2,804 5,253x10 ⁻⁹	2,066 3,876x10 ⁻⁹	1,308 2,454x10 ⁻⁹	1,061 1,991x10 ⁻⁹				
Робоче навантаження	Фунт кН	26600 118,104	27800 123,432	30500 135,42	52100 231,324				
Пробне навантаження	Фунт кН	29300 130,092	30600 135,864	33600 149,184	57300 254,412				
Обмежене навантаження	Фунт кН	42600 189,144	57800 256,632	76700 340,548	106700 473,748				
Основне навантаження	Фунт кН	53300 236,652	72300 321,012	106200 471,528	140800 625,152				
Вага штанги довжиною									
Фути м		30 ' 9,144	37,5' 11,43	30 ' 9,144	37,5 ' 11,43	30 ' 9,144	37,5 ' 11,43	30 ' 9,144	37,5 ' 11,43
Насосна штанга	Фунт Н	9.11 40,45	10.41 46,22	11.66 51,77	10.04 44,58	13.26 58,57	15.24 67,67	15.07 66,91	17.52 77,79
Насосна штанга з 1 муфтою	Фунт Н	10.61 47,11	11.54 51,24	12.21 54,21	13.46 59,76	15.84 70,33	17.82 79,12	18.20 80,81	20.65 91,69
Вага 1-го фути насосної штанги та муфти	фунт / фут Н/м	0,308 0,419	0,407 0,552	0,354 0,482	0,359 0,488	0,528 0,718	0,475 0,646	0,607 0,826	0,551 0,749

лецевого волокна насосної штанги, проаналізовано конструкцію з метою зменшення її вартості, що забезпечило можливості відкачування рідини з свердловин різної глибини та з різною обводненістю продукції. Простий алгоритм порівнює вартість реалізування штанг

VectorRod™ з доходом від додаткового видобутку нафти. Результати порівнянь наведено на рисунку 3. Якщо рідина над насосом та рівень обводнення вище за лінію злива, яка відповідає глибині свердловини, то вартість штанг VectorRod™ окупиться протягом одного року.

Таблиця 3 – Порівняння характеристик насосних штанг

Параметри	Одиниці	Вуглепластик	Скловолокно	Сталь АНІ групи D
Діаметр штанги	мм	19,0	25,0	25,4
Межа міцності σ_b	МПа	2000	620	792
Модуль пружності	МПа $\times 10^5$	1,6	0,5	2,1
Константа пружності	in/lbf-ft $\times 10^{-6}$ мм/Н·м	1.308 2,454 $\times 10^{-9}$	2.210 4,146 $\times 10^{-9}$	0,527 0,988 $\times 10^{-9}$
Максимальне робоче навантаження	Фунт кН	30500 135,420	30000 133,200	27500 122,100
Граничне навантаження (прихоплений плунжер)	Фунт кН	76,700 340,548	40000 177600	62,800 278,832
Максимальне навантаження	Фунт кН	106200 471,528	67,800 301,032	90300 400932
Вага (штанга і 1 муфта)	Фунт Н	17.82 97,12	30.75 136,53	108.9 * 483,516
Вага одного фута Вага одного метра	фунт / фут Н/м	0,475 6,932	0,82 11,967	2,93 42,760

Таблиця 4 – Порівняння вуглепластикових і сталевих (преміум сталь і марка D) штанг

	VectorRod™	Преміум сталь	Сталь АНІ групи D
Глибина, м	3658		
Обводненість, %	90		
Тип верстата-качалки	C-1280-305-260		
Приводний двигун	150 Hp NEMA D		
Діаметр плунжера, дюйми мм	1.5 " 38,1	1.063" 27,0	1 " 25,4
Швидкість відкачування, хв^{-1}	9,5	7,5	3,52
Найвище навантаження на поліровану штангу, фунти кН	24146 107,406	30698 136,551	29233 130,034
Навантаження верстата, %	79	101	97
Навантаження на редуктор, %	99	99	84
Навантаження на колону насосних штанг, %	44 / 64 / 52	100/100	100/100/100
Видобута рідина, барель на добу т/добу	515 70,246	199 27,144	80 10,912
Видобута нафта, барель на добу т/добу	52 7,093	20 2,728	8 1,091
ККД системи, %	47	28	28
Вартість підйому, \$ (\$/bbl@\$0.16/KWH)	5.42	9.13	9.08

Експлуатаційний ресурс вуглепластикових насосних штанг

Незважаючи на те, що кількісно передбачити термін служби нового продукту важко, базова конструкція штанг VectorRod виключає основні причини поломок більшості насосів. Значне зменшення площі поверхні для корозійного впливу та введення корозійно-стійких покриттів на інші металеві компоненти свідчать про ймовірну стійкість елементів штанги до

корозії. Завдяки відсутності значної втоми вуглепластика та зменшення навантажень, які викликають згинання кінцевих сполучних елементів, експлуатаційний ресурс значно збільшено. Зниження навантажень і зменшення жорсткості під час згинання зменшує бічні навантаження в похилих свердловинах та збільшує термін служби як штанг, так і труб. Беручи до уваги все вищезгадане, була поставлена мета – підвищити ресурс стрижнів у три рази.

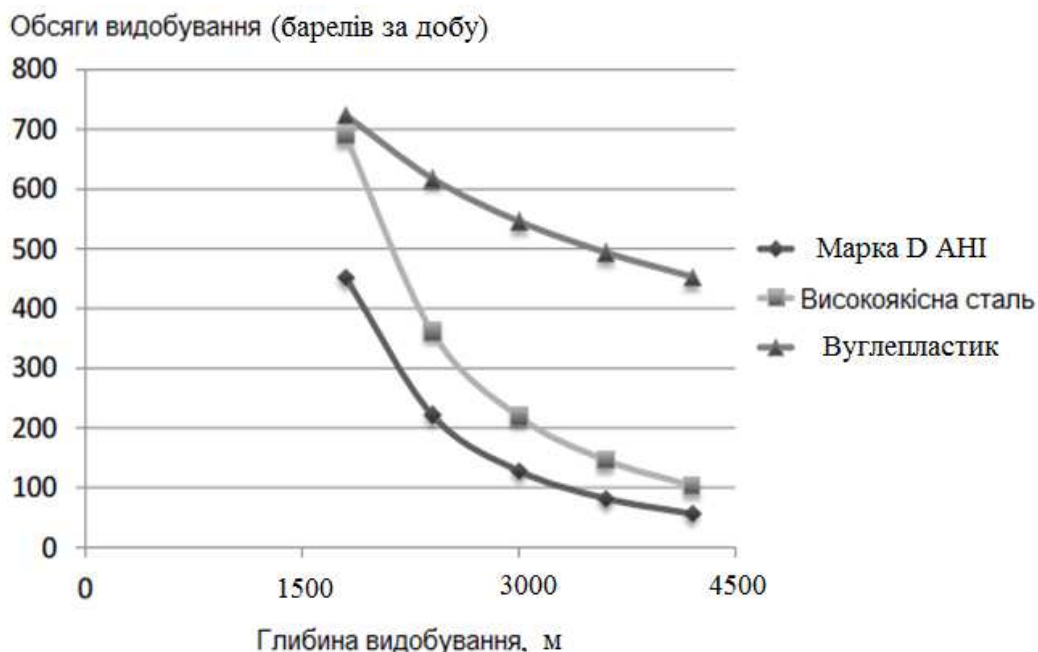


Рисунок 2 – Подача насоса порівняно з глибиною видобування для штанг з різних матеріалів

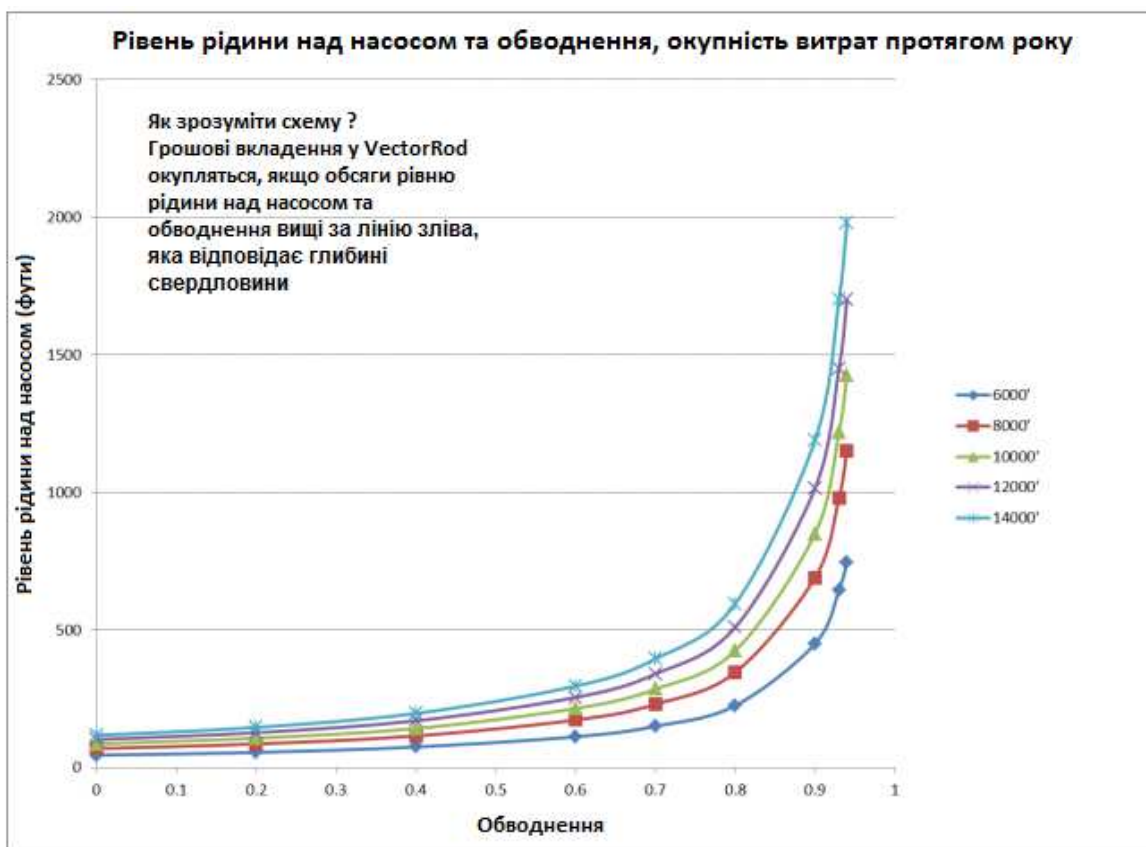


Рисунок 3 – Окупність витрат протягом року

Застосування неперервних вуглепластикових насосних штанг

В світовій практиці крім неперервних сталевих штанг типу COROD знаходять використання неперервні вуглепластикові [10] насосні штанги (рис. 4, табл. 5).

Характеристики вуглеволоконної насосної штанги

1. Високі питомі модулі та межа міцності при розтягуванні; висока стійкість до стирання і висока корозійна стійкість.

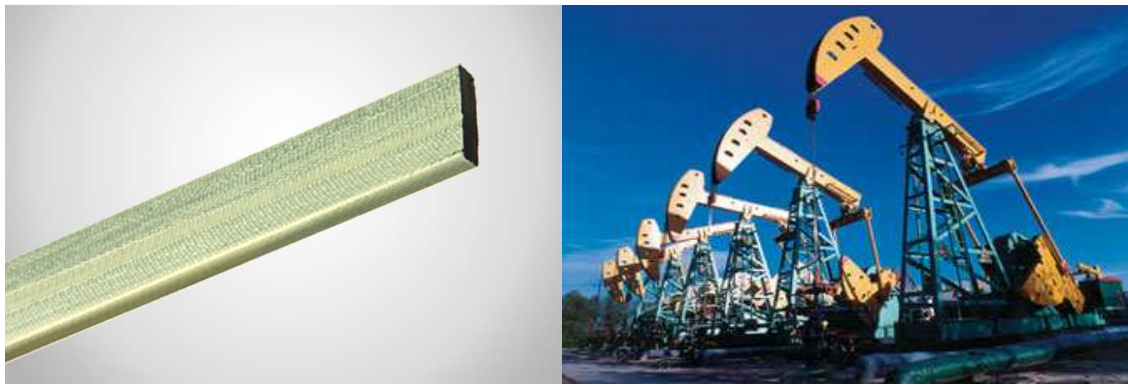


Рисунок 4 – Неперервні вуглепластикові насосні штанги та їх наземне обладнання

Таблиця 5 – Параметри вуглеволоконистої насосної штанги прямокутного перерізу

Форма		Прямокутна	
Розміри (мм)		30×4,5	
Межа міцності (МПа)		≥1800	
Модуль пружності (ГПа)		≥150	
Мінімально допустимий діаметр згинання (мм)		≥350	
Видовження при руйнуванні (%)		≥1,2	
Опір втомі при вібраційних навантаженнях (циклів)		≥10 ⁷	
Опір корозії	3% H ₂ SO ₄	Без дефектів на поверхні. Залишкова міцність ≥90%	За нормальних умов 1000 годин
	3% NaOH		
	3% NaCl		
Опір зміні температури		Залишкова міцність ≥ 90%	-40°C—+150°C
Опір ультрафіолетовому опроміненню та старінню (сонячна радіація)		Без тріщин; Залишкова міцність ≥ 90%	0.65~0.68 Вт/м ² 1000 годин

2. Високий опір втомі. Після 10⁷ циклів випробувань на втому його міцність залишилася на рівні 90% порівняно зі сталевим стрижнем, міцність якого становить лише 30-40%, вуглеволокониста штанга має значно більший термін служби.

3. Мала вага. Композитні колони штанг важать 2 кН / км (вага сталевих штангових колон становить 38 кН/км), що істотно заощаджує електричну енергію, забезпечує можливу експлуатацію у надглибоких нафтових свердловинах і виключає реінвестування ліфтового обладнання.

4. Неперервна штангова колона має тільки два роз'єми – у верхній і нижній частинах, що дозволяє уникнути ефекту поршнювання в процесі видобутку нафти і знизити ймовірність руйнування з'єднань.

5. Завдяки наявності безперервної стрижня колони можна механізувати СПО, заощадити час на проведення робіт і знизити їх трудомісткість.

6. Хороша гнучкість штанги з мінімальним радіусом кривизни в 350 мм. Це дозволяє їх навивати при СПО і транспортуванні.

7. Мала площа поперечного перерізу. Площа поперечного перерізу цієї штанги складає лише 1/5 від того, що має сталева штанга, що зменшує сили опору в процесі опускання і підймання насосної штанги.

8. Застосування цих штанг разом зі сталевими штангами може регулювати пружну частоту, реалізувати перебіг плунжера і збільшити завдяки цьому видобуток нафти. Крім того, стрижневі відходи можуть бути перероблені, не викликаючи забруднення навколишнього середовища.

9. Ці штанги можуть заощадити понад 15% електроенергії і збільшити видобуток нафти на 30%, створюючи таким чином хороший економічний ефект.

σ , МПа

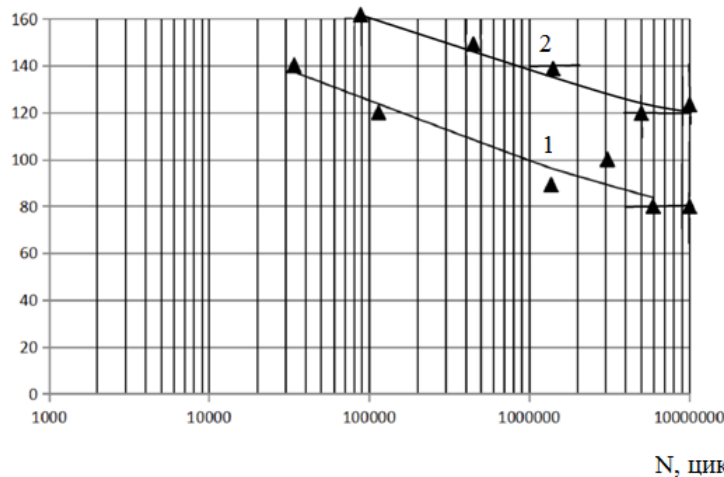


Рисунок 5 – Діаграми втомної міцності склопластикових (крива 1) та гібридних (крива 2) насосних штанг при циклічному згині

Використання методу акустичної емісії для оцінки міцності штанг

Техніка акустичної емісії (АЕ) є неруйнівним методом, який використовувався для визначення типу механізмів ушкодження, що виникають внаслідок втоми композиційного матеріалу. Будь-який тип руйнування, що відбувається в армованому волокном композиті, вивільняє енергію і створює перехідну пружну хвилю [11-12]. Таким чином, пряма інформація про механізми руйнування може бути визначена шляхом аналізу сигналів АЕ, які генеруються під час навантаження (циклічного чи статичного). Розподіли амплітуд АЕ використовувалися для виявлення механізмів пошкодження та моніторингу процесів відмови, тобто коли збільшення частоти подій АЕ було пов'язано з підвищеним рівнем пошкодження матеріалу [13]. Один механізм пошкодження (наприклад, розтріскування матриці) може призводити до широкого діапазону параметрів сигналу АЕ, а перекриття розподілу параметрів може бути викликано ослабленням сигналу [14]. Отже, для певних типів відмов існують різні амплітудні спектри і ця практика приймається в контексті заданого випробування [15]. Для визначення домінантних механізмів руйнування втоми при згині була побудована залежність амплітуди та кількості подій АЕ в залежності від довжини зразка і часу випробування.

Розвиток ушкоджень спостерігався під час випробувань на втому при згині з використанням системи акустичної емісії (Physical Acoustics PCI-2). Два резонансних перетворювачі 300 кГц (Micro 30) були поміщені на навантажувальних пристосуваннях, щоб визначити, коли і де відбулися події пошкодження. Давачі були підключені до попередніх підсилювачів моделі 2/4/6, що забезпечує підсилення сигналу до 40 дБ і смугову фільтрацію в діапазоні частот 200-400 кГц. Місцезнаходження джерела АЕ в зразку реєстрували методом лінійного визначення. Для реєстрації результатів АЕ вико-

ристовували тільки ті події, які були записані між місцями встановлення давачів. Граничний рівень сигналів величиною 30 дБ використовувався для фільтрації перешкод, викликаних впливом гідравлічної системи стенда.

Найважливішими параметрами АЕ для імпульсних сигналів є кількість, амплітуда, тривалість і абсолютна енергія сигналу акустичної емісії. Кількість сигналів враховували як число разів, коли амплітуда сигналу перевищує заданий пороговий рівень. Амплітуда - це найвище напруження пікової хвилі і вона безпосередньо пов'язана з типом події, що відбувається всередині матеріалу. Тривалість - це часовий інтервал між першим перетином порога і останнім перевищенням порога під час події, а абсолютна енергія являє собою площу під випрямленою обвідною отриманого сигналу. Складність, пов'язана з акустичною емісією, викликаної втомою, виникає з джерел тертя, викликаних зломом поверхонь тріщини та розшаруванням джерел тертя пов'язаний зі зміною параметрів АЕ, хоча через те, що обидві події пошкодження і тертя є в значній мірі стохастичними, відповідні параметри сигналу АЕ також повинні перетинатися [17]. Однак Барре і Бенцегга [13] показали, що гібридні системи (вуглепластик-склопластик) можуть проявляти сигнатурні амплітуди АЕ в залежності від режиму руйнування і виробляти як події з високою, так і малою амплітудою. Оскільки в цьому гібридному композиті присутні як скловолокно, так і вуглецеве волокно, механізми руйнування, що виникають в оболонці і осерді, повинні бути помітні, оскільки гібридні системи більш схильні випромінювати сигнали з високою амплітудою через їх більший розмір і швидше руйнування.

Згідно з отриманими результатами побудовано діаграми втомної міцності гібридних насосних штанг при циклічному згині порівняно із склопластиковими насосними штангами (рис. 5).

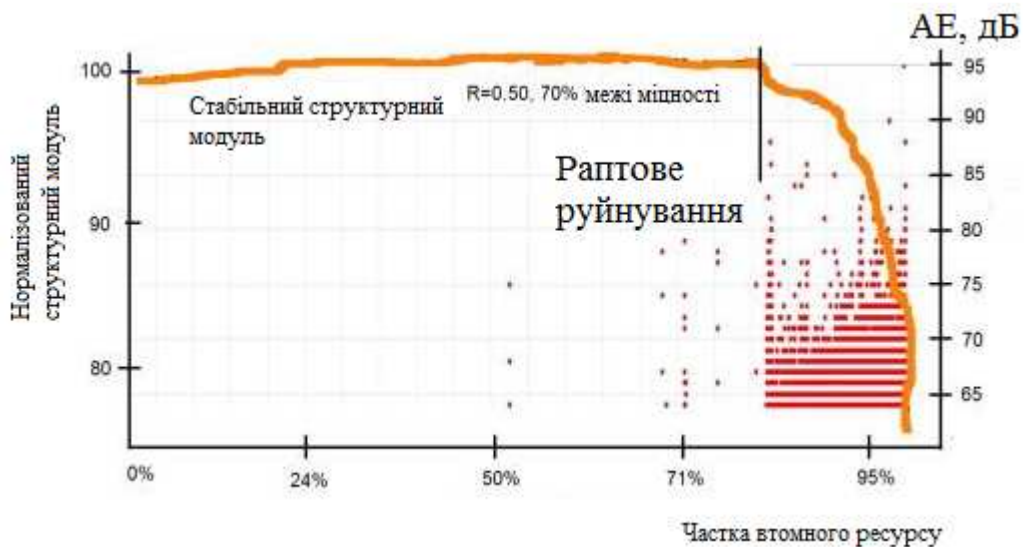
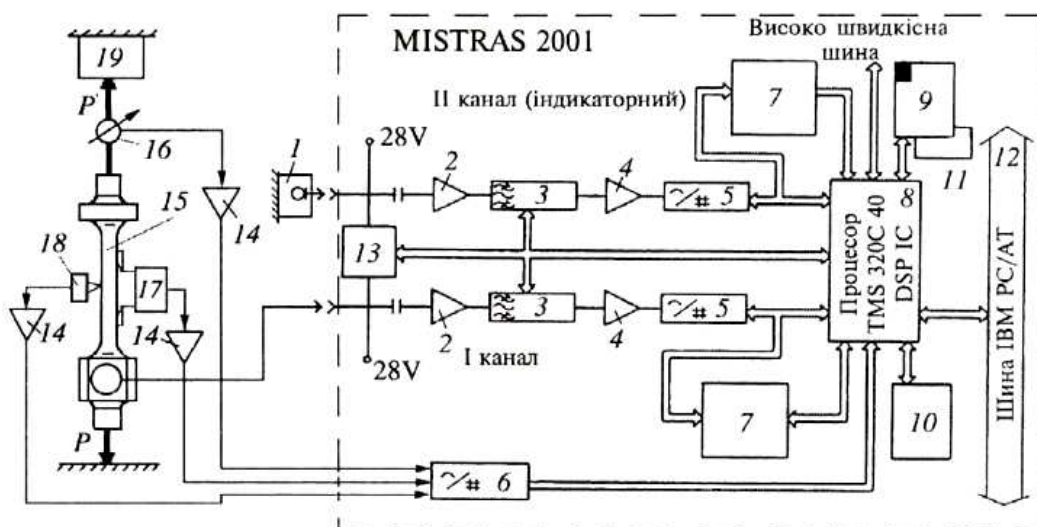


Рисунок 6 – Сигнали АЕ та руйнування гібридних штанг при напруженні, які складають 70% від межі міцності за коефіцієнта асиметрії $R=0,5$

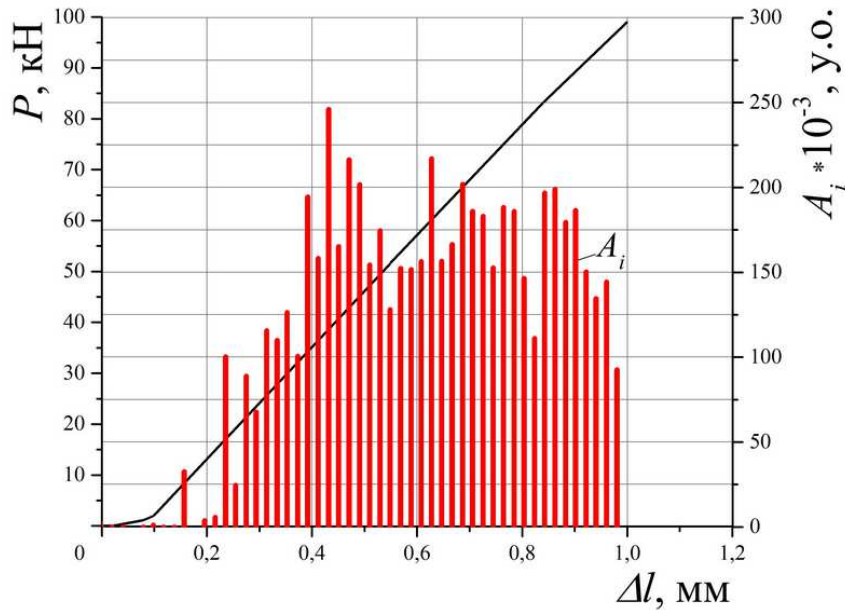


1 - ПАЕ; 2 - попередній підсилювач САЕ; 3 - блок фільтрів верхніх і нижніх частот; 4 - підсилювач потужності; 5, 6 - аналогово-цифровий перетворювач; 7 - блок відтворення зображень у реальному масштабі часу; 8 - блок процесора; 9 - блок оперативної пам'яті; 10 - пам'ять на жорсткому диску; 11 - допоміжний запам'ятовувальний пристрій; 12 - шини персонального комп'ютера; 13 - блок тестування пам'яті; 14 - підсилювач постійного струму; 15 - досліджуваний зразок; 16 - тензометричний динамометр; 17 - тензометричний перетворювач переміщень; 18 - тензометричний перетворювач звуження шийки зразка; 19 - навантажувальна установка

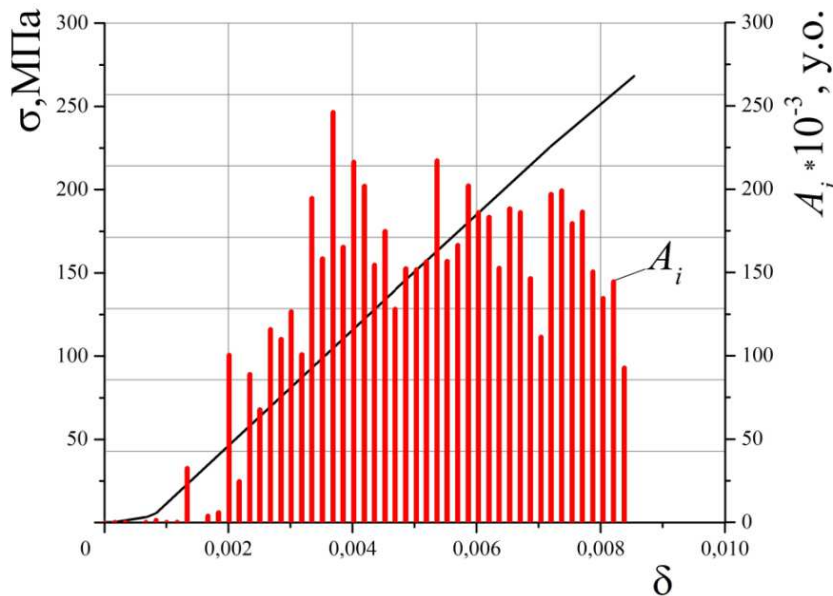
Рисунок 7 – Блок схема експериментальних досліджень склопластикових насосних штанг на акустичну емісію

Оцінку витривалості і довговічності розроблених насосних штанг провели на основі втомних випробувань натурних зразків гібридних штанг діаметром 19 мм при асиметричному розтязі (рис. 6) та склопластикових штанг 22 мм при круговому згині (рис. 8). Зразки, які випробовували при змінних напруженнях згину 100 і 80 МПа до появи тріщин втоми і працювали до 3,091 і 5,955 млн. циклів відповідно, після втомних випробувань підлягали розтягу на розривній машині до величин прикладання зусилля величиною 100 кН з контролем сигналів акустичної емісії (рис. 7, 8).

З результатів експериментів видно, що сигнали АЕ найбільш активно з'являються при навантаженні штанги зусиллям до 50 кН. При цьому вони досягають величин порядку $220-250 \cdot 10^{-3}$ умовних одиниць, а далі, у міру зростання зусилля до 100 кН, затухають і зменшуються до величин $90-110 \cdot 10^{-3}$ умовних одиниць (рис. 8). Розриву штанги після досягнення зусилля розтягу 100 кН не сталося. Це свідчить про те, що склопластикові штанги після появи тріщин втоми все ще має достатній резерв міцності.



а)



б)

а) діаграма «зусилля – деформації»,
 б) діаграма «напруження – відносне видовження»

Рисунок 8 – Діаграми розтягу та інтенсивності сигналів акустичної емісії в штанзі, випробуваній на втому при дії змінного напруження 100 МПа

Висновки

Сучасний стан використання колон насосних штанг має істотні недоліки. Сталеві стрижні є важкими і схильні до втоми, корозії і руйнувань під напруженням. Стрижні зі скловолокна легші, але розтягуються набагато більше, ніж сталеві, тому їх не рекомендують застосовувати для повторних перехідних процесів стиску. Це спонукає до застосування передових технологій під час вибору матеріалу насосних штанг. Розроблено та створено вуглецеве волокно для виготовлення насосних штанг. Аналіз рівняння хвильового руху колони штанг при

експлуатації штангових свердловинних насосних установок вказує на вигідність такої технології. Менша вага колони та стійкість вуглеволокна до корозії можуть забезпечити довший термін служби насосних штанг. На основі аналізу можна зробити висновок, що за певних обставин насосні штанги з вуглецевого волокна слугують справним інструментом для вирішення поточних завдань використання штангових насосів і можуть тривалий час бути економічно виправданими та зменшити збитки при видобуванні нафти. Гібридні штанги мають високий (в 1,5 рази більший опір) втомному руйнуванню, ніж склопластикові насосні штанги.

Література

- 1 <http://www.alrdc.com/workshops/papers/VectorRod™: Carbon Fiber Sucker Rod. Hugh Q. Cook, Jr., Partner and CTO, VectorSum, Inc. – 10 p.>
- 2 <http://www.compositesworld.com/articles/market-outlook-surplus-in-carbon-fibers-future>
- 3 <http://www.edmunds.com/car-news/bmw-to-expand-use-of-carbon-fiber-beyond-i-and-m-cars.html>
- 4 T. Tsukizoe, et. al. Wear Mechanism of Unidirectionally Oriented Fiber reinforced Plastics // ASME Journal of Lubrication Technology. – October, 1977.
- 5 A. Sharma. Study of Wear Pattern Behavior of Aluminum and Mild Steel Discs Using Pin on Disc Tribometer // European Journal of Applied Engineering and Scientific Research. – 2013.
- 6 R Wang et. al. Polymer Matrix Composites and Technology // Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, p. 66.
- 7 A.P. Mouritz. Design Dilemma For Z-Pinned Composite Structures // 27th International Congress Of The Aeronautical Sciences, ICAS.
- 8 American Petroleum Institute, API 11B Specification for Sucker Rods, Polished Rods and Liners, Couplings, Sinker Bars, Polished Rod Clamps, Stuffing Boxes, and Pumping Tees, 27 th edition, May 2010.
- 9 <http://www.doverals.com/theta/en/gn/resources/download/rodstar-d-fix-list, entry for 3.6.2, April 17, 2014.>
- 10 <http://www.leeda-pallettruck.com>
- 11 N. Kar, Y. Hu, E. Barjasteh and S. Nutt Tension-tension fatigue of hybrid composite rods, Composites A 43 2115-2124 2012) DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.006>
- 12 NK Kar, E Barjasteh, EJ Bosze and SR Nutt. Bending fatigue of hybrid composite rods, Composites A 42 (2011) 328-336 DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.012>
- 13 S. Barre, M.L. Benzeggagh. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre reinforced polypropylene // Comp Sci Technol, 52 (1994), pp. 369–376.
- 14 W.H. Prosser, K.E. Jackson, S. Kellas, B.T. Smith, J. Mackeon, A. Friedman. Advanced waveform-based acoustic emission detection of matrix cracking in composites // Mater Eval (1995), pp. 1052–1058.
- 15 I.M. De Rosa, C. Santulli, F. Sarasini. Acoustic emission for monitoring the mechanical behaviour of natural fibre composites: a literature review // Composites: Part A (2009), pp. 1456–1469.
- 16 J. Awerbuch, M.R. Gorman, M. Madhukar, Monitoring acoustic emission during quasi-static loading-unloading cycles of filament wound graphite epoxy laminate coupons // Mater Eval, 43 (1985), p. 754.
17. Y.A. Dzenis. Cycle based analysis of damage and failure in advanced composites under fatigue. Experimental observation of damage development within loading cycles // Int J Fatigue, 25 (2003), pp. 499–510.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
15.10.17*

*Рекомендована до друку
професором Райтером П.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук Хомицем З.Д.
(ТОВ «ЕМПІ-сервіс», м. Івано-Франківськ)*