

Дослідження та методи аналізу

УДК 62.026.004.67

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОШКОДЖЕНОЇ СТАЛЕВОЇ ТРУБИ КОМПЗИТНИМ БАНДАЖЕМ

¹Б.В.Копей, ¹А.М.Найда, ²В.В.Розгонюк, ³О.В.Максимук, ³Н.В.Щербина

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353,
e-mail: koreu@ifdtung.if.ua

²НАК "Нафтогаз України", 01001, м. Київ, вул. Б.Хмельницького, 6, тел. (044) 4612537,
e-mail: spas@ugr.viaduk.net

³Інститут проблем механіки і математики ім. Я.Підстригача НАН України,
79026, м. Львів, вул. Наукова, 3-Б, e-mail: prom@cm.lviv.ua

Рассматривается способ повышения прочности и надежности стальных труб при воздействии внутреннего давления. Он состоит в нанесении на внешнюю поверхность трубы (в случае поврежденности материала) укрепляющего слоя – композитного бандаж. Этот слой формируется по специально разработанной технологии из тканного композита (текстолита) и выполняет функцию укрепления стальной трубы. Местонахождение и уровень поврежденности стальной трубы устанавливается по экспериментальной методике.

Оценка эксплуатационной прочности металлической трубы с поврежденностью в случае нанесения укрепляющего слоя производится расчетным способом с помощью сформулированной математической модели и экспериментальным методом.

Целью исследования является определение эффективности использования укрепляющего слоя, а также проверка соответствия значений теоретических расчетов значениям, полученным экспериментальным путем.

Останнім часом досить гостро постає проблема захисту металевих трубопроводів від дії негативних чинників і підвищення їх міцнісних характеристик. Одним з ефективних методів підвищення міцнісних характеристик є нанесення на зовнішню поверхню покриття захисного шару з полімерного композитного бандаж.

Розглядається запропонований спосіб підвищення міцності й надійності сталевих труб при дії внутрішнього тиску. Він полягає в нанесенні на зовнішню поверхню труби (у разі пошкодженості матеріалу) зміцнювального шару – композитного бандаж. Цей шар формується за спеціально розробленою технологією із тка-

It is considered way of increasing of toughness and reliability of the steel pipes in action of the internal pressure. It consists in fixing on external surface of the pipe (in the event of damage of material) a consolidating layer - a composite bandage. This layer is formed by specially designed technology from woven composite (textolite) and executes the function of the fortification of the steel pipe. The way and level of steel pipe damage is fixed by experimental methods.

The estimation to working toughness of the metallic pipe with damage in the event of fixing consolidating layer is executed by rated way by means of worded mathematical model and experimental method.

The purpose of the study is the efficiency determinations of use the consolidating layer, as well as checking the correspondence of importance theoretical calculation to importance got by experimental way.

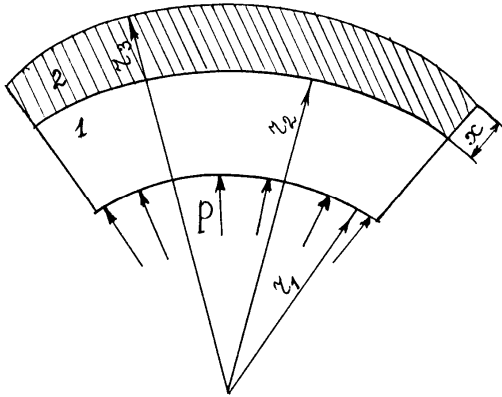
ного композиту (текстоліту) і виконує функцію зміцнення сталеві труби. Місцезнаходження та рівень пошкодженості сталеві труби встановлюється за експериментальною методикою.

Оцінку експлуатаційної міцності металеві труби з пошкодженістю у разі нанесення зміцнювального шару виконуватимемо розрахунковим способом за допомогою сформульованої математичної моделі [2] та експериментальним методом.

Метою дослідження є визначення ефективності використання зміцнювального шару, а також перевірка відповідності значень теоретичних розрахунків значенням, одержаних експериментальним шляхом.

1 Математична модель

Розглядається конструкція труби з бандажем, що моделюється двошаровою оболонкою (рис. 1). У разі пошкодженого матеріалу труби на зовнішній її поверхні утворюють зміцнювальний шар. Припускаємо, що забезпечується ідеальний контакт його із силовим (внутрішнім) сталевим шаром. [2]



1 – сталеві оболонка; 2 – зміцнювальний шар із композитного матеріалу (бандаж)

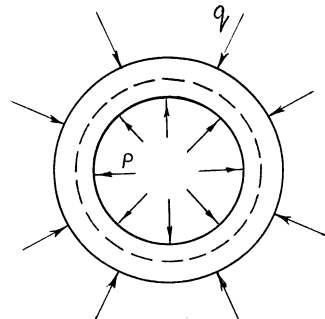
Рисунок 1 — Схема конструкції труби з бандажем

Аналіз міцності шаруватих труб експериментальним способом пов'язаний з труднощами, що зумовлені структурними особливостями і технологією їхнього виготовлення. Skorистаємося для цієї мети розрахунковим способом.

Замінімо дію зовнішнього шару труби контактним тиском q (рис. 2), тоді напруження в сталевій трубі визначаємо за формулами (розв'язання задачі Ламе):

$$\sigma_{rr} = \frac{Pr_1^2 - qr_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(P-q)r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)r^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{Pr_1^2 - qr_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(P-q)r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)r^2}. \quad (2)$$



q – контактний тиск

Рисунок 2 — Умови навантаження

Тут величина q обчислюється через комплекс характеристик зовнішнього і внутрішнього шарів.

$$q = -P \left[1 + C \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

де

$$C = \frac{E_f - (1 - \nu_1) \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right)}{\left[\frac{r_2^2}{r_1^2} (1 - \nu_1) + (1 + \nu_2) \right] \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right) - E_f \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1 \right)}, \quad (4)$$

$$E_f = \frac{E_1}{E_2} \left[(1 - \nu_2) \frac{r_2^2}{r_3^2} + (1 + \nu_2) \right]. \quad (5)$$

У наведених формулах:

E_1, E_2 – модулі Юнга для матеріалів труби і бандажа відповідно;

ν_1, ν_2 – коефіцієнти Пуассона для матеріалів труби і бандажа відповідно;

r_1, r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси труб відповідно, м;

r – радіус точки, в якій визначаються напруження, мм;

P, q – внутрішній і контактний тиски відповідно, МПа.

$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}$ – радіальні і дотичні напруження відповідно, МПа.

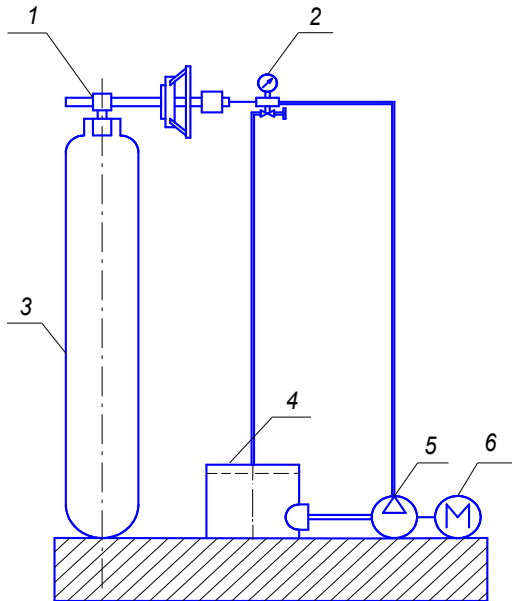
2 Експериментальне дослідження

Експериментальне дослідження полягало в проведенні гідравлічного випробування балонів з намотаним бандажем на основі синтетичної тканини, текстоліту, на поверхню якого встановлювали давачі тензовиміральної апаратури. Випробування проводилось на кисневому і газовому вуглекислотному балонах.

На балон за добу до проведення експерименту намотувався бандаж на основі текстоліту. Адгезія бандажа з тілом проводилась за допомогою епоксидного клею. Намотування бандажа проводилось у декілька шарів. Випробування проводилось на стенді для гідравлічного випробування балонів (рис. 3). Балон 3 наповнювали водою і з допомогою штуцера 1 приєднували до гідравлічного насоса 5. Насос приводився в рух з допомогою електродвигуна. Тиск у кисневому балоні піднімали до 16,0 МПа і через кожні 2,0 МПа знімали показники з тензодавачів. На газовому вуглекислотному балоні тиск піднімали до 10,0 МПа і показники знімали також через кожні 2,0 МПа. Балони мали такі характеристики:

а) кисневий балон: тип балона 150Л; умовний тиск 15,0 МПа; гідравлічний тиск (випробувальний) 22,5 МПа; зовнішній діаметр 219 мм; товщина стінки 7 мм; довжина корпусу балона 1390 мм.

б) балон газовий вуглекислотний тип балона 100; умовний тиск 10,0 МПа; гідравлічний тиск (випробувальний) 15 МПа; зовнішній діаметр 150 мм; товщина стінки 5,2 мм; довжина корпусу балона 850 мм.



1 – штуцер; 2 – манометр; 3 – балон; 4 – бак для води; 5 – гідравлічний насос; 6 – електродвигун

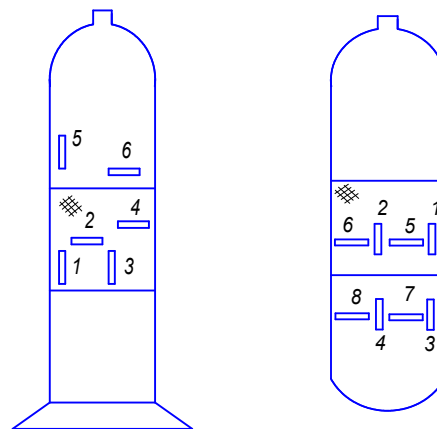
Рисунок 3 — Стенд для гідравлічного випробування

У таблицях 1 і 2 наведено результати випробувань. Розташування давачів на балонах зображено на рис.4.

Обробка даних експерименту полягла в такому. Перш за все визначаються дотичні напруження, що виникають на зовнішній поверх-

ні тіла балона без бандажу в результаті дії внутрішнього тиску (радіальні напруження не визначаємо, оскільки на зовнішній поверхні балона вони рівні нулю) на основі формули 2. Далі визначаємо коефіцієнт перетворення даних експерименту для наступного визначення значень дотичних напружень, що виникають на зовнішній поверхні бандажу. Аналогічно визначаємо напруження σ_0 в поперечних перерізах балона від дії повздовжньої сили N на площу поперечного перерізу балона F. Дані напруження вираховуємо за такою формулою:

$$\sigma_0 = \frac{N}{F} = \frac{P}{r_2^2 - r_1^2} r_1^2 \quad (6)$$



а) балон кисневий;
б) балон газовий вуглекислотний

Рисунок 4 — Розташування давачів на балонах

Таблиця 1 — Балон кисневий

P, МПа	Номери давачів					
	1	2	3	4	5	6
0	298	212	300	219	261	171
2,0	291	200	300	204	257	165
4,0	288	192	297	194	255	154
6,0	285	184	295	182	252	144
8,0	282	175	292	172	250	133
10,0	279	167	290	163	249	125
12,0	277	159	288	151	246	113
14,0	273	150	286	141	243	102
16,0	270	141	283	131	241	92

Таблиця 2 — Балон газовий вуглекислотний

P, МПа	Номери давачів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	550	462	496	390	547	438	463	411
2,0	548	458	494	387	543	424	457	398
4,0	545	454	492	384	537	412	451	386
6,0	543	450	490	380	532	400	444	374
8,0	541	448	487	377	524	388	436	372
10,0	539	444	485	374	517	375	427	350

Таблиця 3 — Визначення значень дотичних напружень, що виникають на зовнішній поверхні бандажу кисневого балона в результаті дії внутрішнього тиску і ефективності використання бандажу

P, МПа	0	2	4	6	8
σ_{θ} , МПа	0	59,594	119,188	178,782	238,376
Експериментальні дані 6-го давача	171	165	154	144	133
$K_{\text{пер}}$	0	9833,01	18354,95	25757,57	31704,01
Експериментальні дані 2-го давача	212	200	192	184	175
Експериментальні дані 4-го давача	219	204	194	182	172
σ_{θ} , МПа для 2-го давача	0	46,38	95,59	139,99	181,17
σ_{θ} , МПа для 4-го давача	0	44,89	94,61	141,53	184,32
Ефективність використання бандажу для 2-го давача, %	–	22,2	19,8	21,7	24
Ефективність використання бандажу для 4-го давача, %	–	24,7	20,6	20,8	22,7
P, МПа	10	12	14	16	
σ_{θ} , МПа	297,97	357,564	417,158	476,752	
Експериментальні дані 6-го давача	125	113	102	92	
$K_{\text{пер}}$	37246,25	40404,73	42550,12	43861,18	
Експериментальні дані 2-го давача	167	159	150	141	
Експериментальні дані 4-го давача	163	151	141	131	
σ_{θ} , МПа для 2-го давача	223,03	254,19	283,67	311,07	
σ_{θ} , МПа для 4-го давача	228,51	267,58	301,77	334,82	
Ефективність використання бандажу для 2-го давача, %	25,2	28,9	32	34,8	
Ефективність використання бандажу для 4-го давача, %	23,3	25,2	27,7	29,8	

Визначаємо дотичні напруження, що виникають на зовнішній поверхні кисневого балона без бандажу на основі формули 2. Оскільки $r = r_2$, то дана формула буде мати такий вид:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2K^2}{1-K^2} P, \quad (7)$$

де $K = \frac{r_1}{r_2}$. (8)

Значення σ_{θ} визначаємо при $P=0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$ МПа. Геометричні розміри балона такі: $r_1 = 106$ мм, $r_2 = 109,5$ мм. Результати розрахунку наведено в таблиці 3. Тут також наведено отримані дані в результаті експерименту для 6-го давача (ряд 3), оскільки він і визначає значення дотичних напружень на зовнішній поверхні балона без бандажу. За допомогою цих даних, а також розрахованих значень σ_{θ} (ряд 2) визначаємо коефіцієнт перетворення $K_{\text{пер}}$, шляхом множення значень ряду 2 на відповідні значення ряду 3. Дані 6-го давача вибираємо як базові, на основі яких будемо розраховувати дотичні напруження, що вини-

кають на зовнішній поверхні бандажу в результаті дії внутрішнього тиску. 2-й і 4-й давачі якраз і визначають ці дотичні напруження. Для перетворення значень цих давачів (ряди 5 і 6) у значення дотичних напружень (ряди 7 і 8) перемножуємо значення $K_{\text{пер}}$ (ряд 4) на відповідні значення рядів 5 і 6. У рядах 9 і 10 наведено значення ефективності використання бандажу, які вказують, на скільки процентів зменшилось значення дотичних напружень на зовнішній поверхні бандажу порівняно зі значеннями дотичних напружень на зовнішній поверхні тіла балона без бандажу. Ця ефективність визначається таким чином:

100% – (відповідні значення рядів 7 і 8 / значення ряду 2) \times 100%.

Аналогічно визначаємо значення дотичних напружень для балона газового вуглекислотного, який має такі геометричні розміри: $r_1 = 72,4$ мм, $r_2 = 75$ мм. Дані розрахунку наведено в табл. 4.

Тепер визначаємо напруження σ_0 в поперечних перерізах балонів від дії поздовжньої сили N на основі формул 7 і 8. Аналогічно проводимо обробку експериментальних даних. Значення розрахунків наведено в таблицях 5 і 6.

Таблиця 4 — Визначення значень дотичних напружень, що виникають на зовнішній поверхні банджа балона вуглекислотного газового в результаті дії внутрішнього тиску і ефективності використання банджа

P, МПа	0	2	4	6	8	10
σ_0 , МПа	0	54,704	109,408	164,112	218,816	273,52
Експериментальні дані 8-го давача	411	398	386	374	372	350
Експериментальні дані 7-го давача	463	457	451	444	436	427
$K_{пер}$ для 8-го давача	0	21772,19	42231,49	61377,89	81399,55	95732
$K_{пер}$ для 7-го давача	0	24999,728	49343,01	72865,73	95403,8	116793,04
Експериментальні дані 5-го давача	547	543	537	532	524	517
Експериментальні дані 6-го давача	438	424	412	400	388	375
σ_0 , МПа для 5-го давача	0	46,04	91,89	136,97	182,07	225,91
σ_0 , МПа для 6-го давача	0	51,35	102,5	153,44	209,79	255,28
Ефективність використання банджа для 5-го давача, %	–	15,8	16,1	16,54	16,79	17,4
Ефективність використання банджа для 6-го давача, %	–	6,13	6,31	6,5	4,12	6,67

Таблиця 5 — Визначення значень напружень σ_0 у поперечних перерізах балона від дії поздовжньої сили N, що виникають на зовнішній поверхні банджа кисневого балона в результаті дії внутрішнього тиску і ефективності використання банджа

P, МПа	0	2	4	6	8
σ_0 , МПа	0	29,79	59,59	89,382	119,176
Експериментальні дані 5-го давача	261	257	255	252	250
$K_{пер}$	0	7656	15195	22524	29794
Експериментальні дані 1-го давача	298	291	288	285	282
Експериментальні дані 3-го давача	300	300	297	295	292
σ_0 , МПа для 1-го давача	0	26,3	52,76	79,03	105,65
σ_0 , МПа для 3-го давача	0	25,5	51,16	76,35	102,03
Ефективність використання банджа для 1-го давача, %	–	11,72	11,5	11,58	11,35
Ефективність використання банджа для 3-го давача, %	–	14,4	14,2	14,6	14,4
P, МПа	10	12	14	16	
σ_0 , МПа	148,97	178,764	208,558	238,352	
Експериментальні дані 5-го давача	249	246	243	241	
$K_{пер}$	37093	43975	50679	57442	
Експериментальні дані 1-го давача	279	277	273	270	
Експериментальні дані 3-го давача	290	288	286	283	
σ_0 , МПа для 1-го давача	132,95	158,76	185,64	212,75	
σ_0 , МПа для 3-го давача	127,91	152,69	177,2	202,97	
Ефективність використання банджа для 1-го давача, %	10,7	11,2	11,0	10,74	
Ефективність використання банджа для 3-го давача, %	14,14	14,6	15,04	14,84	

Таблиця 6 — Визначення значень напружень σ_0 у поперечних перерізах балона від дії поздовжньої сили N, що виникають на зовнішній поверхні бандажа балона вуглекислотного газового в результаті дії внутрішнього тиску і ефективності використання бандажа

P, МПа	0	2	4	6	8	10
σ_0 , МПа	0	27,36	54,72	82,08	109,44	136,8
Експериментальні дані 3-го давача	496	494	492	490	487	485
Експериментальні дані 4-го давача	390	387	384	380	377	374
$K_{пер}$ для 3-го давача	0	13515,84	26922,24	40219,2	53297,26	66348
$K_{пер}$ для 4-го давача	0	10588,32	21012,48	31190,4	41258,88	51163,2
Експериментальні дані 1-го давача	550	548	545	543	541	539
Експериментальні дані 2-го давача	462	458	454	450	448	444
σ_0 , МПа для 1-го давача	0	24,66	49,39	74,07	98,52	123,09
σ_0 , МПа для 2-го давача	0	23,12	46,28	69,312	92,09	115,2
Ефективність використання бандажа для 1-го давача, %	–	9,87	9,74	9,76	9,98	10,02
Ефективність використання бандажа для 2-го давача, %	–	15,5	15,4	15,6	15,85	15,79

Таблиця 7 — Теоретичні і практичні значення дотичних напруження, що виникають на зовнішній поверхні бандажа кисневого балона в результаті дії внутрішнього тиску

P, МПа	0	2	4	6	8
σ_θ , МПа для 2-го давача	0	46,38	95,59	139,99	181,17
σ_θ , МПа для 4-го давача	0	44,89	94,61	141,53	184,32
σ_θ , МПа теоретичне	0	48,21	98,74	144,86	189,54
P, МПа	10	12	14	16	
σ_θ , МПа для 2-го давача	223,03	254,19	283,67	311,07	
σ_θ , МПа для 4-го давача	228,51	267,58	301,77	334,82	
σ_θ , МПа теоретичне	229,87	270,65	310,94	345,66	

Таблиця 8 — Теоретичні і практичні значення дотичних напруження, що виникають на зовнішній поверхні бандажа балона газового вуглекислотного в результаті дії внутрішнього тиску

P, МПа	0	2	4	6	8	10
σ_θ , МПа для 5-го давача	0	46,04	91,89	136,97	182,07	225,91
σ_θ , МПа для 6-го давача	0	51,35	102,5	153,44	209,76	255,28
σ_θ , МПа теоретичне	0	52,80	103,63	153,68	209,83	260,38

Проведемо теоретичне визначення значень дотичних напруження, що виникають на зовнішній поверхні бандажа балонів на основі формул 2, 3, 4, 5. Оскільки $r = r_3$, то формула (2) буде мати такий вигляд:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{Pr_1^2 - qr_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(P - q)r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)r_3^2} \quad (9)$$

Зовнішній радіус бандажа r_3 дорівнює сумі зовнішнього радіуса балона r_3 і товщини бандажа δ : $r_3 = r_2 + \delta$. Для кисневого балона

$\delta = 0,65$ мм; для балона газового вуглекислотного $\delta = 0,85$ мм. Для матеріалу балонів (сталь) коефіцієнт Пуассона $\nu_1 = 0,3$. Для матеріалу бандажа (текстоліт) коефіцієнт Пуассона $\nu_2 = 0,2$. Модуль Юнга для матеріалу балонів (сталь) $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Модуль Юнга для матеріалу бандажа (текстоліт) $E_2 = 0,1 \cdot 10^5$ МПа. Підставляючи дані значення у формули 3, 4, 5, 9, отримуємо теоретичне визначення значень дотичних напруження, що виникають на зовнішній поверхні бандажа балонів.

Розраховані значення даних напружень, а також порівняння їх з практичними наведено в таблицях 7 і 8.

Отже, ефективність використання бандажу знаходиться в межах 6,13%-17,4% по напруженнях від дії поздовжньої сили і 19,8%-34,8% для дотичних напружень, що виникають у результаті дії внутрішнього тиску.

Різниця між теоретичними і експериментальними даними є незначна, що вказує на правильність проведення і обробки даних експерименту.

Висновки

1. Проведено експериментальне дослідження визначення ефективності використання бандажу на балонах різних геометричних розмірів.

2. Проведено порівняння теоретичних значень дотичних напружень і напружень, що виникають у результаті дії поздовжньої сили, від

вують процес спікання композиту і поліпшують потрібні його фізико-механічні властивості.

При спіканні під тиском у таких матеріалах проходить ряд складних процесів: дифузія кобальту в карбід вольфраму, зміна механізмів значень цих напружень, отриманих експериментальним шляхом.

Література

1. Писаренко Г.С., Квітна О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів /за ред. Г.С. Писаренка. – К.: Вища школа, 1993. – 655 с.

2. Копей Б.В., Розгонюк В.В., Максимук О.В., Щербина Н.В., Найда А.М. Зміцнення пошкодженої сталеві труби композитним бандажем: модель і розрахунок // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2003. – №5(5). – С.31-36.

3. Безвербный А.Ф. Силовые и геометрические соотношения в многослойных трубах и сосудах давления / В кн.: Многослойные сварные конструкции и трубы. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 296-302.

УДК 548.39:539.2

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОНТАКТУ АЛМАЗ-МАТРИЦЯ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ БУРОВИХ ВСТАВОК НА ОСНОВІ ВК6 З ДОДАТКАМИ CrB₂

М.О.Бондаренко, В.А.Мечник, О.Г.Кулик

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України,
04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, тел. (044) 4675625, e-mail: bond@eism.kiev.ua

В работе показано, что введение CrB₂ в композицию на основе С_{алмаз}-ВК при спекании по специально подобранному технологическому режиму совершенствует металлическую зону вокруг алмаза и повышает механические характеристики буровых вставок. Выявлено, что при этом в композиции происходит перераспределение компонентов как в алмазном слое, так и в матрице и образуется на контакте алмаз-матрица достаточно сильная химическая связь. Эти обстоятельства существенно повышают износостойкость и качество таких вставок.

In the work it has been shown that introduction of CrB₂ into C_{diamond}-(WC-Co)- based composition during sintering in specially chosen technological conditions improves the metal region around diamond and increases mechanical characteristics of boring inserts. There has been found that with this in the composition the redistribution of components takes place both in diamond layer and in carbide substrate, and enough strong chemical binding occurs on "diamond-matrix" contact. These circumstances essentially increase wear-resistance and quality of such inserts.

Проблема створення надтвердих композитних матеріалів (НКМ) з високими фізико-механічними властивостями зумовлена вимогами промисловості, зокрема застосуванням НКМ для виготовлення бурового інструменту. Бурові вставки виготовляють методами порошкової металургії під дією високих температур і тисків. У початковому стані ці матеріали складаються з суміші частинок природних чи штучних алмазів із дрібнішими частинками порошкових матеріалів. Для бурових вставок частіше використовують матриці на основі вольфрамокобальтових сплавів групи ВК. В ці системи інколи вводять різноманітні добавки, які акти-

перенесення маси, хімічні реакції між компонентами шихти, утворення нових фаз і пасивне переміщення алмазів, їх взаємодія з елементами шихти. Деякі з цих процесів проходять одночасно, інші послідовно.

Відомо [1-3], що при спіканні композитів із суміші порошкових матеріалів тиск і температура збільшують парціальні коефіцієнти дифузії, інколи на декілька порядків. При цьому зменшується енергія активації дифузії, збільшуються швидкості хімічних реакцій та усадки. Вивчення впливу тиску і температури спікання на утворення міцного контакту алмаз-матриця є