

УДК 621.672

**АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ
ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

© Т. А. Роїк, д.т.н., професор, П. О. Киричок, д.т.н., професор,
А. П. Гавриш, д.т.н., професор, О. А. Гавриш, д.т.н., професор,
НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**Исследованы структура и комплекс свойств композиционных
антифрикционных материалов на основе меди в зависимости
от технологии изготовления. Показана перспективность
применения новых материалов для узлов трения
высокоскоростного полиграфического оборудования.**

**The structure and complex properties of composite antifriction
materials on the base of copper in the dependence
of manufacturing technology have been researched.
It was shown the prospect of application a new materials
for high-speed polygraph equipment friction units.**

Постановка проблеми

Розвиток сучасного приладо- і машинобудування, зокрема, поліграфічного, характеризується неухильним зростанням вимог, що висуваються до якості деталей та функціональних вузлів обладнання, насамперед, вузлів тертя, що працюють у екстремальних умовах. До таких вузлів відносяться пари тертя сучасного ротативного поліграфічного устаткування, які у процесі експлуатації піддаються впливу високих швидкостей обертання, сягаючих 10000—12800 об/хв., що відповідає швидкостям ковзання $V = 70—80$ м/с.

Ще більш ускладнюється робота високошвидкісних вузлів тертя, коли на контактну пару додатково діють зовнішні навантаження, що призводять до розігріву змазуючого мастила і робочих поверхонь до температур 120—140 °С. Вказані умови експлуатації класифікуються як гранично важкі і мають місце у роботі поліграфічного високообертового обладнання, де окрім високих швидкостей обертання пара

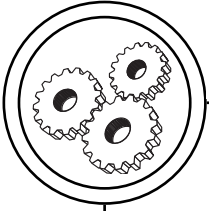
тертя піддається дії питомих навантажень до 3,5—7,0 МПа.

Традиційно для зазначених умов роботи для матеріалів підшипників використовують бабіти. Проте, не зважаючи на їх високі антифрикційні властивості, одночасна дія високих швидкостей ковзання і високих навантажень призводить до деформації та руйнування робочих поверхонь підшипника, втрати експлуатаційних властивостей вузла тертя, і, як наслідок, виходу устаткування з ладу.

Тому комплекс завдань, спрямованих на підвищення працездатності вузлів тертя поліграфічної техніки за рахунок підвищення надійності і довговічності підшипників ковзання, є актуальними питаннями, вирішення яких значно підвищить ефективність роботи високообертового устаткування.

Аналіз попередніх досліджень

Підшипникові матеріали, що одержуються методами порошкової металургії, мають, як відомо [1], ряд цінних переваг порівняно з ли-



тими сплавами, а саме: можливість точного регулювання антифрикційних властивостей завдяки введенню різних домішок, що можуть взаємодіяти чи не взаємодіяти з матеріалом основи, значна економія металів внаслідок майже повної відсутності втрат у стружку, економія енерговитрат і, нарешті, мінімізація забруднень довкілля.

Серед багатьох відомих [1] композиційних антифрикційних матеріалів, призначених для роботи в широких діапазонах умов їх експлуатації, окрему групу складають матеріали для високошвидкісних вузлів тертя. Зазначені матеріали працюють при швидкостях ковзання $V > 15$ м/с, відомі вузли тертя, у яких швидкості ковзання сягають 220—250 м/с.

Найбільш розповсюдженими підшипниковими сплавами серед литих матеріалів є бабіти Б83, БК, Б88, які відрізняються високою несучою здатністю (P·V) [1, 2]. Саме ця обставина спричинила використання бабітів у високошвидкісних вузлах тертя. При цьому, враховуючи, що бабіти мають низькі фізико-механічні властивості [1], у тертьових парах в багатьох випадках шар бабіту наносився на більш міцну підкладку основного металу підшипника, зокрема, з низько- чи середньовуглецевих сталей.

Проте, як показали реальні умови роботи, не зважаючи на високі антифрикційні властивості, жоден з бабітів у гранично важких умовах роботи не забезпечує тривалу і стабільну роботу вузла тертя високооборотного обладнання. При високих швидкостях ковзання (до 100 м/с), навантаженнях на пару тертя (до 7 МПа), температурах 120—140 °С спостерігається різке падіння механічних властивостей робочого антифрикційного бабітового шару, мають місце локальні підплавлення

бабіту і, як наслідок, зменшення несучої здатності підшипнику.

Перелічені обставини стали підставою для проведення комплексу робіт, спрямованих на пошук альтернативних бабітовим сплавам антифрикційних матеріалів, здатних поєднувати стабільні механічні властивості з високими триботехнічними характеристиками у гранично важких умовах тертя відцентрового поліграфічного обладнання.

Мета роботи

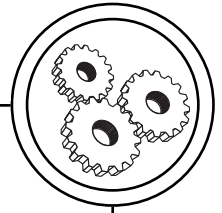
Метою роботи є дослідження технології одержання, структурно-фазової будови і комплексу властивостей антифрикційних композиційних матеріалів на основі міді для підшипників ковзання високооборотної поліграфічної техніки.

Результати проведених досліджень

Опубліковані у літературі [1—5] відомості про роботу антифрикційних матеріалів у гранично важких умовах тертя базуються на використанні метода оцінки матеріалів за їх несучою здатністю (добуток навантаження на швидкість — P·V). Вказаний параметр характеризує область навантажень і швидкостей, де зазначений матеріал може задовільно працювати. Тому при проведенні досліджень враховували значення P·V, їх можливий діапазон для забезпечення максимально повної відповідності експериментів реальним умовам роботи підшипника.

Як правило, для роботи в умовах високих швидкостей і навантажень при підвищених температурах, згаданих вище, використовуються матеріали, що відповідають ряду основних вимог:

— низький коефіцієнт тертя і висока зносостійкість при терті з мас-



тилом, граничному терті і при аварійному припиненні подачі мастила;

— висока корозійна стійкість проти дії оточуючого і робочого середовища;

— висока механічна міцність, теплопровідність і жароміцність.

Переліченим вимогам відповідають композиційні антифрикційні матеріали на основі заліза, нікелю, порошкових нержавіючих сталей і міді [1—4]. Вибір певного матеріалу визначається конкретними умовами його роботи. Так, матеріали на основі заліза з домішками у різних комбінаціях графіту, сульфїду цинку, олова, кремнію використовуються при швидкостях ковзання 70—100 м/с, проте мають обмеження за величиною навантажень — $P = 0,1—0,4$ МПа ($P \cdot V = 20—40$ (МПахм/с) [1]. Композиційні матеріали на основі порошкових нержавіючих сталей ПХ18Н15КБ, ПХ23Н18МЦс та інші використовуються при $V = 60—75$ м/с і $P = 0,1—0,3$ МПа ($P \cdot V = 6—20$ (МПахм/с) [1, 4], залізонікелеві матеріали (ЖНБМ) успішно працюють при $V = 10—30$ м/с та $P = 7,5—8,0$ МПа, матеріали на основі міді ДГр30ЖН1К, ДНЗФК мають несучу здатність $P \cdot V = 20—150$ (МПахм/с) [4].

Наведені дані показують, що для надтоважких умов роботи максимальну несучу здатність можуть забезпечити композиційні матеріали на основі міді. Оскільки в умовах високих швидкостей ковзання і навантажень на поверхнях тертя встановлюються підвищені температури, що призводять до сильної локальної, а потім і до загальної пластичної деформації шарів поверхні, доцільно використовувати матеріали, котрі мають високий опір пластичній деформації і що містять речовини, які інтенсифікують утворення розділових плівок. Крім цього, застосовувані матеріали у зазначених умовах роботи по-

винні забезпечити інтенсивне відведення тепла із зони тертя, тобто мати високу теплопровідність.

Вказаним вимогам можуть у повній мірі відповідати антифрикційні матеріали на основі міді, які стали предметом дослідження даної роботи.

Таким чином, для проведення комплексу досліджень, що включає визначення технологічних особливостей одержання, структури і фазового складу, фізико-механічних та триботехнічних властивостей, було виготовлено композиції двох складів, мас. %:

I — $Cu + 5Ni + 9CaF_2$ (ДН5КФ9);

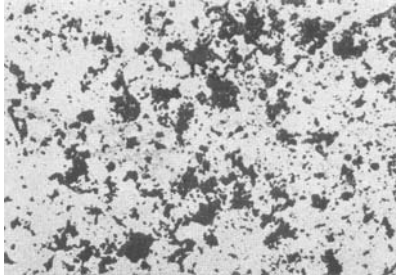
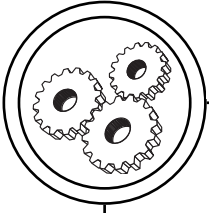
II — $Cu + 10C$ (ДГр10).

Введення CaF_2 до складу I обумовлено властивостями як розповсюдженого твердого мастила, що відрізняється високою хімічною і термічною стабільністю до 1200 °С. Причому кількість CaF_2 у межах 5—12 мас. % є оптимальною для реалізації його функціональних властивостей [6].

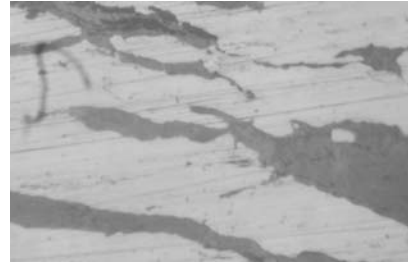
Оскільки введення фториду кальцію призводить до зниження міцності металевої матриці, для підвищення механічних властивостей здійснювали легування нікелем мідної основи матеріалу.

Додавання графіту як твердого мастила у кількості 10 мас. % у складі II здійснювали виходячи з відомих [1, 5] даних про його введену кількість у залежності від умов роботи матеріалів.

Для виготовлення шихтових композицій використовували: порошок міді марки ПМС-Н, просіяний через сито з сіткою № 0063; порошок нікелевий марки ПНК-ОТ4 у стані поставки (частинки розміром менше 10 мкм); порошок фторида кальцію, просушений при 120 °С, 1 год. та просіяний через сито з сіткою № 0100; порошок графіту з розміром частинок ~1 мкм.



а



б

Рис. 1. Мікроструктура досліджених матеріалів: а — Cu + 5 % Ni + 9 % CaF₂, ×300; б — Cu + 10 % C, ×650

При введенні до складу композицій неметалевих речовин (у нашому випадку фториду кальцію і графіту), як відомо [1], між частинками зменшується кількість контактів метал-метал і виникає більше число контактів метал—неметал, неметал—неметал, які мають низьку міцність. Тому для одержання достатньої для підшипників міцності матеріали виготовляли з дрібних частинок порошків у нижченаведеній послідовності.

Після операції змішування шихтові склади піддавались пресуванню при питомих тисках 400—500 МПа з використанням гідравлічно-

го пресу ПСУ-125 за технологією двократного пресування з метою мінімізації поруватості матеріалів. Спінання одержаних пресовок здійснювали при 820—870 °C у середовищі водню.

В результаті виконаних технологічних операцій було одержано матеріали складів I і II, які мали поруватість 7 та 9 % відповідно.

Металографічна структура обох матеріалів — гетерогенна (рис. 1), що, як відомо [1], є визначальним фактором для матеріалів антифрикційного призначення.

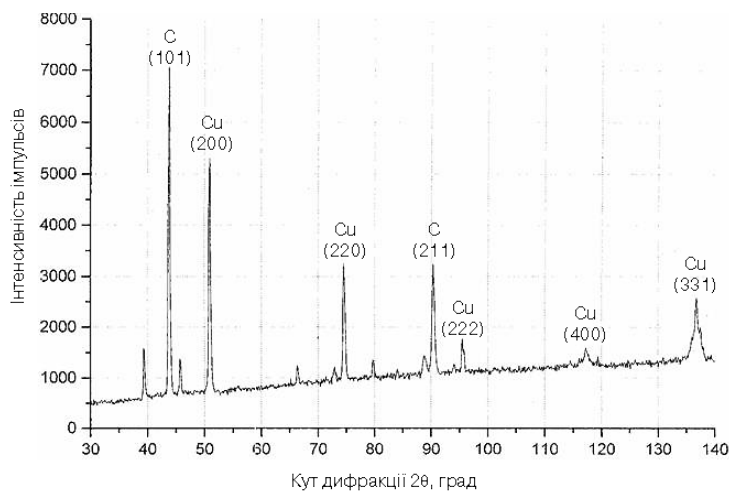


Рис. 2. Рентгенограма матеріалу Cu + 10% C (ДГр10)

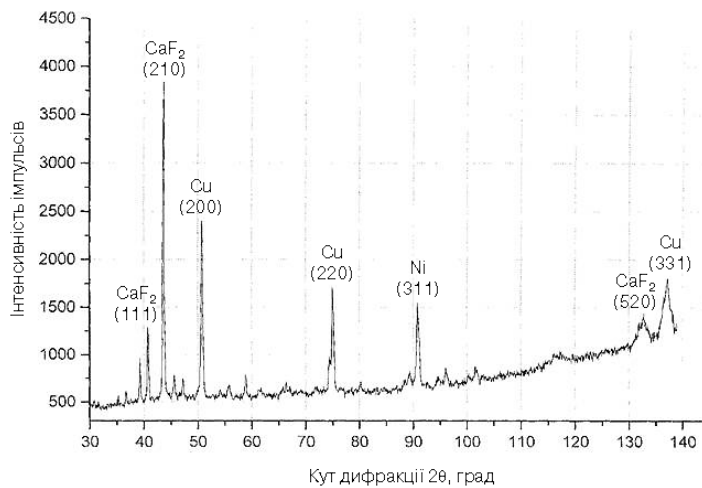
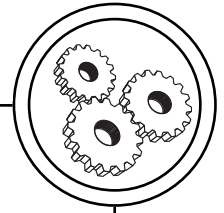


Рис. 3. Рентгенограма матеріалу Cu + 5 % Ni + 9 % CaF₂ (ДН5КФ9)

Структура матеріалу I являє собою легований нікелем твердий розчин на основі міді з рівномірно розподіленими частинками CaF₂ у металевій матриці (рис. 1, а), що було підтверджено виконаним рентгенофазовим аналізом (рис. 2, 3, табл. 1, 2).

Виконання рентгенофазового аналізу здійснювали на дифрактометрі ДРОН-4С-01 у Cu_{Kα} — випромінюванні.

Як показують результати експериментів і розрахункові дані (рис. 2, 3, табл. 1, 2), в матеріалі ДН5КФ9 після спікання у металевій (Cu+Ni)-матриці залягає тверда змащувальна речовина — фторид кальцію, що зберігається у вихідному стані.

Внаслідок того, що графіт не взаємодіє з міддю, структура композиційного матеріалу складу II являє собою мідну матрицю з рівномірно розподіленими у ній частинками графіту, що показано на рис. 1, б.

Вказана металографічна структура обох композиційних матеріалів у поєднанні з присутньою твердою

змащувальною речовиною (CaF₂ або С) забезпечує формування сплавів з гетерогенною структурою, що є важливою обставиною для матеріалів антифрикційного призначення [1].

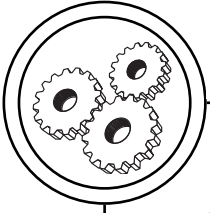
Одержана структура матеріалів забезпечила формування у композиціях I та II комплексу фізико-механічних, теплофізичних і триботехнічних властивостей, значення яких у порівнянні з литим бабітом Б83, наведено у табл. 3.

Для триботехнічних випробувань використовували машину тертя ВМТ-1 [7], що має можливість створювати високі питомі навантаження на пару тертя, проте яка має обмеження за швидкостями ковзання. Тому при дослідженнях виходили з практики дотримання рівності несучої здатності (P·V) при різних P і V:

— за реальними умовами роботи: P·V = 70,5 м/с·3,5 МПа = 246,75 (МПахм/с);

— за умовами випробувань: P·V = 6,4 м/с·38,5 МПа = 246,4 (МПахм/с).

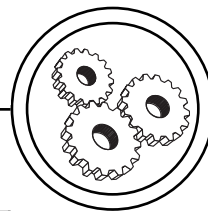
Таким чином, для збереження рівності P·V при зменшенні швид-



Таблиця 1

Результати розрахунку рентгенограм матеріалу ДГр10

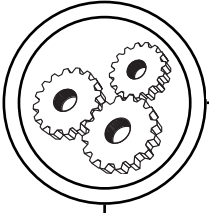
№	I, %	2θ	θ	sin θ _α	sin θ _β	α, β	d/n	Cu			C			
								HKL	d/n	I	HKL	d/n	I	
1.	0,16	38	19	0,325568	0,298686	α	2,365880							
2.	1,0	44	22	0,374606	0,343675	α	2,056173				101	2,02	0,10	
3.	0,11	46	23	0,39073	0,358467	β ₄	1,971322							
4.	0,72	52	26	0,43837	0,40217	α ₄	1,915247							
5.	0,37	75	37,5	0,60876	0,55849	α	1,265285	220	1,271	0,71				
6.	0,35	91	45,5	0,713250	0,654358	α	1,079922							
7.	0,11	96	48	0,743144	0,681783	α	1,036481	222	1,038	0,56				
8.	0,10	117	58,5	0,8526401	0,782238	α	0,903376	400	0,900	0,29				
9.	0,19	136	68	0,927183	0,850626	α	0,830747	331	0,826	0,56				



Таблиця 2

Результати розрахунку рентгенограм матеріалу ДН5КФ9

№	I, %	2θ	θ	sin θ _α	sin θ _β	α, β	d/n	Cu			Ni			CaF ₂			
								HKL	d/n	I	HKL	d/n	I	HKL	d/n	I	
1.	0,15	39	19,5	0,33380	0,306244	α	2,3074								111	2,312	0,30
2.	0,25	42	21	0,35836	0,328777	α	2,1493										
3.	1,0	44	22	0,37460	0,343675	α	2,0561								210	2,035	0,10
4.	0,56	51	25,5	0,43051	0,394964	α	1,7891	200	1,798	0,86							
5.	0,32	75	37,7	0,60876	0,55849	α	1,2652	220	1,271	0,71	200	1,250	0,40				
6.	0,26	91	45,5	0,71325	0,654357	α	1,0799				311	1,067	0,60				
7.	0,10	134	67	0,92050	0,844499	α	0,8367								520	0,841	0,2
8.	0,18	137	68,5	0,93041	0,853593	α	0,8278	331	0,826	0,56							



Таблиця 3

Властивості композиційних підшипникових матеріалів для високих швидкостей тертя

№ п/п	Склад, мас. %	Твердість, НВ, МПа	Межа міцності при згині, $\sigma_{\text{и}}$, МПа	Теплопровідність, λ , Вт/(м·град)	Питоме навантаження, Р, МПа	Коеф. тертя, f	Знос, мкм/км	t° зразка, °С	Примітки
1.	ДН5КФ9 (Cu+5Ni+9CaF ₂)	519—625	180—240	56	18,0	0,16	30	130	Тертя без мастила
					38,5	0,18—0,2	46	240	
2.	ДГр10 (Cu+10С)	296	190—200	110	18,0	0,034	5	43	
					38,5	0,051	15,4	80	
3.	Бабіт Б83	300	210	46,5	18,0	0,028	7	51	
					38,5	пластична деформація	~264		

кості ковзання (V) збільшували навантаження (P).

Умови випробувань:

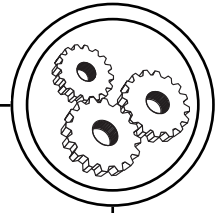
- швидкість ковзання, V = 6,4 м/с;
- питоме навантаження, P = 18,0 и 38,5 МПа;
- контртіло—сталь 20Х (HRCэ = 51—55);
- шлях тертя — 1 км;
- схема спряження: вал—пальчиковий зразок;
- тертя з мастилом — масло індустріальне И-20.

Аналіз результатів досліджень показує, що нові композиційні антифрикційні матеріали (табл. 2. поз. 1, 2) за фізико-механічними властивостями не поступаються властивостям литого бабіту Б83, а за величиною теплопровідності — перевершують його, завдяки чому забезпечується зниження температури зразка при високих P·V [8].

Триботехнічні властивості нових композиційних матеріалів ДГр10 та ДН5КФ9 свідчать про те, що за їх рівнем вказані матеріали у надто-

важких умовах роботи значно перевершують литий бабіт Б83. При цьому матеріал ДН5КФ9 також демонструє високі антифрикційні властивості при випробуваннях без мастила. Високі навантаження на пару тертя призводять до підвищення температури у робочій зоні (до 300 °С), що є позитивним для роботи матеріалів, які містять у своєму складі високотемпературне тверде мастило — CaF₂ [6], коли рідке мастило стає непрацездатним.

Матеріал на основі міді, що містить у своєму складі графіт — ДГр10, має найкращі антифрикційні характеристики при роботі з мастилом у даних умовах навантаження, і, маючи високу теплопровідність, забезпечує низьку температуру робочої поверхні завдяки інтенсивному відведенню тепла із зони тертя. Наявність графіту забезпечує перенесення матеріалу твердого мастила на робочу поверхню контртіла, про свідчить утворення розділових антизадирих плівок. Загальний вигляд зразка з



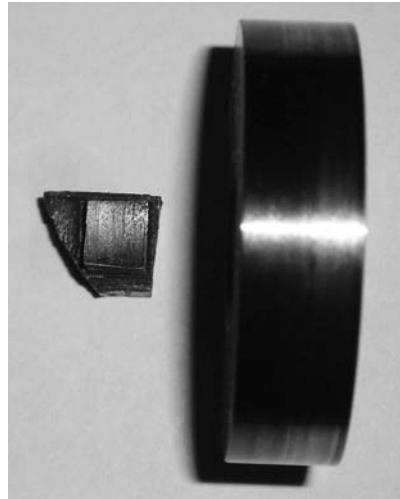
матеріалу ДГр10 і контртіла зі сталі 20Х, що терлось у парі з ним, показано на рис. 4.

Як видно з рис. 4, поверхні тертя досліджуваного матеріалу і контртіла відрізняються суцільністю, гладкістю і рівномірністю, без ділянок сколів і схоплювань, а присутність твердого мастила (у даному випадку — графіту) в робочій зоні може забезпечити тривалу і стабільну роботу вузла тертя при раптовому припиненні подачі змащувального мастила або інших аварійних ситуаціях.

Висновки

Виконані дослідження показують перспективність використання композиційних антифрикційних матеріалів ДГр10 та ДН5КФ9 для роботи у надтоважких режимах тертя і можуть бути рекомендовані для виготовлення підшипників ковзання відцентрового високооборотного поліграфічного обладнання.

При цьому найбільш доцільним представляється виготовлення підшипників, виконаних цілком з композиційного матеріалу, а не тільки



а б

Рис. 4. Поверхня тертя матеріалу підшипника ДГр10 (а) і контртіла зі сталі 20Х (б) після триботехнічних випробувань

нанесення робочого шару з нього. Така конструкція дозволить здійснювати механічну обробку (підгонку) підшипників ковзання на металорізальних верстатах без небезпеки порушити (або пошкодити повністю) антифрикційний шар.

1. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. — К.: Наукова думка, 1980. — 404 с. 2. Зозуля В. Д. Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. — К.: Наукова думка, 1989. — 288 с. 3. Пугина Л. И., Агеева В. С., Слысь И. Г. Новые антифрикционные спеченные материалы для тяжелых условий работы // Вестник машиностроения. — 1974. — № 12. — С. 25—28. 4. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский, М. С. Ковальченко, П. С. Кислый, Т. Я. Косолапова, В. К. Май, Н. И. Щербань. — К.: Наукова думка, 1985. — 624 с. 5. Humenik M., Hall D.W., Alsten R.L. Graphite-base cermets a new material for bearing, electrical and high-temperature applications // Metal Progress. — 1982. — 81. — № 5. — Р. 101—108. 6. Шевчук Ю. Ф., Роик Т. А. Порошковые антифрикционные материалы для работы при повышенных температурах // Порошковая металлургия. — 2001. — № 1—2. — С. 53—58. 7. Зозуля В. Д., Роик Т. А., Варченко В. Т. Особенности высокотемпературной трибологии порошковых материалов // Порошковая металлургия. — 1988. — № 4. — С. 101—104. 8. Роик Т. А., Шевчук Ю. Ф., Варченко В. Т. Порошковые подшипники скольжения для высокоскоростных узлов трения // Оборудование и инструмент для профессионалов. — Харьков: Центр «Инфо». — 2006. — № 2. — С. 14—15.