

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 53.08(531.383)

ПРЕЦИЗИЙНІ ТОРСІОННІ ПРУЖИНИ

¹⁾Силенко П.М., ²⁾Копань В.С., ¹⁾Інститут проблем матеріалознавства НАН України ім. І.М. Францевича, м. Київ, Україна; ²⁾Київський національний університет ім. Т. Шевченка, м. Київ, Україна

В статті повідомляється про результати дослідження торсіонів, виготовлених із шаруватих волокон карбиду кремнію. Нестабільність нульового положення торсіонного підвісу із карбиду кремнію, в 10-15 разів менша, ніж у приладів з кварцовими підвісами і в 50-100 разів менша, в порівнянні з підвісами із сплаву ВР-27

Вступ

Точність гіроскопів, гальванометрів, крутильних терезів та інших приладів в значній мірі визначається стабільністю параметрів пружних чутливих елементів (ПЧЕ). Для виготовлення ПЧЕ використовують матеріали, що мають малу повзучість. До недавнього часу найбільш розповсюдженими були ПЧЕ з кварцу, тому що повзучість кварцу майже вдесятеро менша, за повзучість тугоплавких сплавів [1].

До недоліків кварцевих ПЧЕ належать зниження їх міцності у вологому повітрі та неможливість виготовлення ПЧЕ з однаковими параметрами. Перший недолік усувають формуванням захисних покриттів із благородних металів на поверхні пружних елементів. В той же час цей метод не ефективний для високоточних приладів із-за значного збільшення пружної післядії, обумовленої текучістю матеріалу покриття (в таких композиційних торсіонах при крученні найбільше навантаження припадає на зовнішній металевий шар). Другий недолік при існуючій технології виготовлення кварцевих волокон усунути проблематично.

Кварцеві волокна виготовляють витягуванням, тому їх діаметр відрізняється більше, ніж на 15-20 % на довжині 1-2 м навіть у випадку неперервних волокон, що призводить до неможливості отримання торсіонів з однаковими параметрами. Вказані недоліки кварцевих пружних елементів спонукали розроблювати металеві для застосування в серійних приладах [2-3]. Кращими виявилися торсіони з берилієвих бронз, молібден-ренієвих і вольфрам-ренієвих сплавів.

Вимоги до точності гіроскопічних приладів постійно підвищуються. Так, необхідно, щоб стабільність положення динамічної рівноваги чутливого елемента, підвішеного на торсіоні, була забезпечена з точністю до 2-3 кут. с після закручування чутливого елемента на 180° на протязі 60 хв. в температурному діапазоні 173 - 423 К, при цьому жорсткість торсіона повинна бути близькою до 1 г·см/рад., а руйнівне зусилля – не менше 2 кГс.

Металеві торсіони таким жорстким вимогам не відповідають. Наприклад, кращі торсіони із сплавів ВР-27, МР-50 та МР-47ВП забезпечують стабільність нульового положення чутливого елемента з похибкою до 10 кут. хв, що на два порядки менше необхідної точності. Недостатня стабільність металевих торсіонів обумовлена власне природою повзучості в металах [3].

Вимоги малої жорсткості обумовлюють застосування високонавантажених торсіонів (механічні розтягуючі напруження яких досягають 50% часової границі міцності), які працюють в області пластичності. Неминучим наслідком цього є пружна післядія металевих торсіонів, дрейф нульової точки приладів.

З вищесказаного випливає емпіричне правило для пошуку перспективних матеріалів для торсіонів: необхідно використовувати матеріали, в яких межа пружності близька до межі міцності. Найбільш тугоплавкі і в той же час міцні металеві матеріали мають межу пружності, близьку до межі міцності лише при мінусових температурах (73 К).

Хромові та берилієві сплави задовольняють емпіричному правилу вже при 373 К, однак вони недостатньо міцні, з них також важко виготовити торсіонні пружини зі стабільними параметрами [4].

Отже для виготовлення високостабільних торсіонів необхідно використовувати крихкі виокремлені матеріали, у яких межі міцності та пружності близькі. Кварцеві волокна задовольняють цьому правилу, тому зрозуміло, що вони довгий час були єдиним матеріалом для виготовлення гальванометричних підвісів. Ми проаналізували перспективні матеріали з огляду на їх придатність для виготовлення торсіонів. Критерієм оцінки матеріалів вибрали величину Q , умовно названу якістю підвісу:

$$Q = \frac{P}{M\beta}, \quad (1)$$

де P – максимальне розтягуюче навантаження, M – момент закручування, β – кут неповернення до нуля чутливого елемента гіроприладу після закручування на 90° .

Порівняння значень Q проводили по відношенню до якості вольфрамового торсіона Q_w при однакових β для всіх торсіонів. Одержано наступний ряд перспективних матеріалів (Табл.):

Ряд перспективних матеріалів суттєво зменшиться, коли ми врахуємо значення β при плюсових температурах. В цьому випадку найбільш перспективними матеріалами для торсіонів є карбід кремнію та графіт. Вуглецеві моноволокна, які виготовляються нині, мають низьку міцність (межа міцності при розтягу $\sigma_p \approx 0,5$ ГПа). Вуглецеві волокна у вигляді джгутів більш міцні, однак вони непридатні для виготовлення торсіонів внаслідок великого тертя між волокнами джгута. В той же час карбід кремнію, що має високі значення міцності та пружності, у вигляді неперервних волокон виготовляють у ПІМ НАН України, і він є доступним матеріалом. Межа міцності волокон при розтягу дорівнює $\sigma_p = 2-2,5$ ГПа, а повзучість (при точності реєстрації відносного видовження 10^{-6}) починається при температурах вище 1073 К [5]. У кварцевих волокон така повзучість спостерігається вже при кімнатній температурі. Тому припускали, що по стабільності нульового положення чутливого елемента торсіон із карбиду кремнію буде значно кращим. Про успішне застосування пружних чутливих елементів із карбиду кремнію повідомляється також в [6-7].

Метою даної роботи є розробка методики виготовлення та дослідження нестабільності нульового положення і жорсткості торсіонів із волокнистого карбиду кремнію.

Таблиця. Перспективні матеріали для торсіонів

№ п/п	Назва матеріалу	Q/Q_w
1	кварцеве волокно	4,4
2	S-скло	2,8
3	E-скло	2,6
4	ниткоподібний кристал Fe	3,1
5	ниткоподібний кристал SiC	2,6
6	ниткоподібний кристал Al_2O_3	2,2
7	ниткоподібний кристал C	1,7
8	сталь ($\sigma_B=500$ кгс/мм ²)	1,6
9	сплав W-Re ($\sigma_B=450$ кгс/мм ²)	1,0

Експериментальна частина

Волокна карбіду кремнію виготовлювали методом газофазного хімічного осадження [8].

Для досягнення малої післядії підвісів необхідно використовувати відрізки волокон, що мають потовщення на кінцях (торсіони гантельного типу), тому для виготовлення карбідокремнієвих торсіонів використовували відрізки волокон (довжина = 110 мм, діаметр -100 мкм), на кінцях яких формували циліндричні потовщення із тугоплавкого скла, коефіцієнт термічного розширення якого більший, ніж у карбіді кремнію. Торсіон має шарувату мікроструктуру (рис.1), що є сприятливим чинником з огляду на підвищення міцності матеріалу, оскільки межі шарів в багатшаровому матеріалі блокують розповсюдження тріщин [9,10].

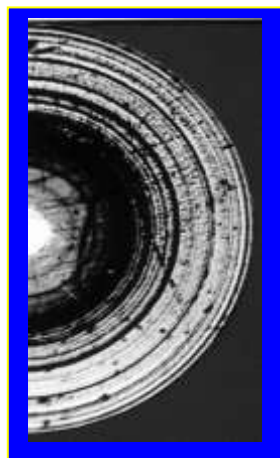


Рисунок 1 – Фрагмент поперечного перерізу торсіона

В зв'язку з тим, що торсіон працює разом з яким-небудь тілом, підвішеним на його вільному кінці (наприклад, рамка в магнітному полі, ротор кіловольтметра, гіроскоп, коромисло терезів тощо), для вимірювання жорсткості та нестабільності нульового положення торсіонів розробили установку, що імітує їх реальні умови роботи (рис.2). Торсіон 1 закріплювали в затискачах 2 і 3 і розташовували по осі трубчатого нагрівача

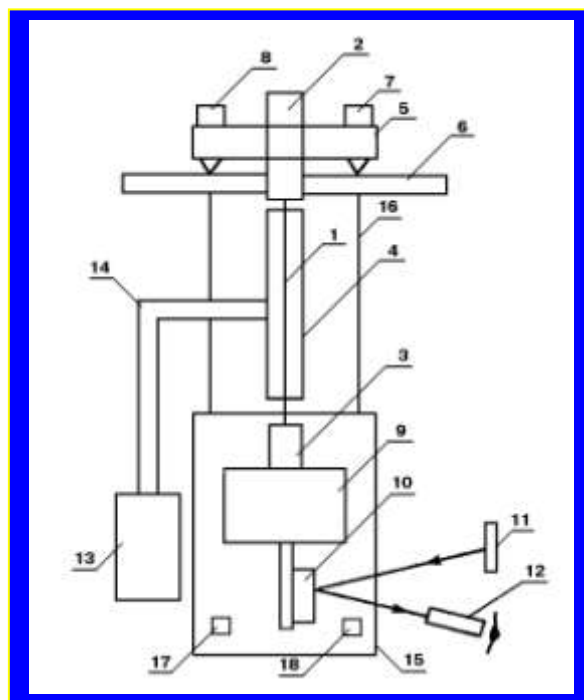


Рисунок 2 – Схема установки для дослідження торсіонів

холодильника 4. Верхній затискач 2 закріплений на платформі 5, яка розташована на нерухомій основі 6. Кут нахилу осі затискача 2 до вертикалі встановлюється гвинтами 7 та 8. На нижньому затискачі 3 закріплювали вантаж 9 із немагнітного матеріалу (для того, щоб уникнути впливу нестабільності магнітного поля Землі). На вантажі 9 закріплене дзеркало 10. На віддалі $R=12$ м від дзеркала розташована шкала 11, відлік на якій здійснювали за допомогою теодоліту 12, розташованого на віддалі 0,6 м від дзеркала. Нагрівали торсіон біфілярною ніхромовою спіраллю, розташованою на корпусі нагрівача-холодильника. Для охолодження торсіона термос 13 заповнювали рідким азотом. Один кінець мідного теплопроводу 14 занурений в термос, а другий кінець теплопроводу з'єднаний з корпусом нагрівача-холодильника. Маятник 9 розміщений в кожусі 15, а торсіон оточений кожухом 16. Для дослідження впливу конвекційних потоків на стабільність підвісів в кожусі 15 розташовані два нагрівачі 17 і 18, потужність яких однакова і дорівнює 10 Вт. Розділювальна здатність теодоліта 12 дозволяє робити відлік на шкалі положення маятника з точністю 0,3 мм., що відповідає куту ~ 2 кут.с.

Результати та їх обговорення

Дослідження параметрів торсіонів проводили на установці, схема якої наведена на рис. 2. Спочатку оцінювали точність визначення нульового положення торсіонного підвіса:

$$\Delta n_0 = \frac{0,3\text{мм}}{2 \cdot 1200\text{мм}} \approx 2'' , \quad (2)$$

Амплітуди n_i коливання маятника 9 визначали по 5 вимірюваннях, після чого визначали нульове положення n_0 за формулою:

$$n_0 = \frac{\frac{n_1 + n_3 + n_5}{3} + \frac{n_2 + n_4}{2}}{2} , \quad (3)$$

де n_1, n_3, n_5 – значення послідовних амплітуд при відхиленні маятника вправо, n_2, n_4 – значення послідовних амплітуд при відхиленні маятника вліво.

Дрейф нульової точки визначали по формулі :

$$\Delta n_0 = (n_0' - n_0) \cdot 15 \text{ кут.с} \quad (4)$$

де n_0 – значення початкового нульового положення,

n_0' – значення після закручування маятника на $90-180^\circ$.

На рис.3 показані залежності нульових положень вільних крутильних коливань від часу для торсіонних підвісів, що мають різні умови закріплення верхнього кінця торсіона. Торсіони серії 1 були закріплені між стальними пластинами з застосуванням мідної фольги; серії 2 - з застосуванням стальної фольги; серії 3- закріплені безпосередньо між стальними пластинами. Як було вказано вище, на кінці наплавляли потовщення із тугоплавкого скла з метою створення стискуючих напружень в поверхневому шарі торсіона. Монотонна зміна значення n_0 обумовлена повзучістю в фольгах, причому зміна значення n_0 торсіонів серії 1 більша, що можна пояснити більшою повзучістю міді в порівнянні зі сталлю. Періодичні зміни n_0 на протязі доби викликані зміною напрямку конвекційних потоків у кожусі 15.

Підтвердженням цього був такий експеримент. Маятник підігрівали по черзі

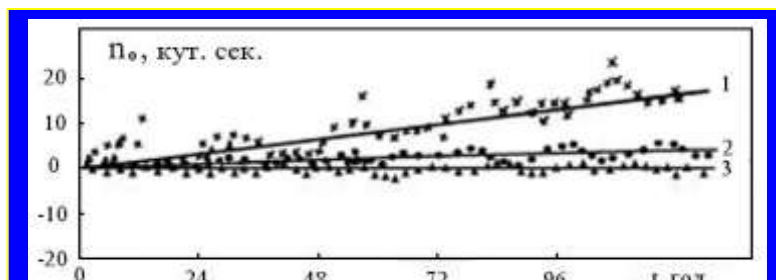


Рисунок 3 – Залежність положення динамічної рівноваги вільних крутильних коливань маятника від часу при різних способах закріплення кінців торсіонів

лівим 17 і правим 15 нагрівачами, при цьому різниця температур повітря в лівій і правій частині кожуха складала 0,5 - 1,0 градус. Наслідки зміни n_0 в цих умовах зображені на рис. 4. В точці a вимикали один нагрівач і вмикали другий. Як бачимо із рисунка, відбувається інверсія n_0 з виходом на насичення по мірі стабілізації конвекції.

Окремі викиди (точки δ) на кривій $n_0=f(t)$ з'явилися в наслідок удару молотком по капітальній стіні в точці, віддаленій від місця підвішування маятника на віддалі 3,5 м. Отже окремі викиди на кривих $n_0=f(t)$ (рис.3) можна пояснити вібраціями приміщення, а добові коливання n_0 - конвекцією всередині кожуха приладу.

Залежності величини неповернення в нуль $\beta = k\Delta n/\alpha$ (де k -ціна поділки шкали, α -кут закручування торсіона відносно нульового положення) від величини перевантаження торсіона σ/σ_p (де σ - діюче напруження, σ_p - межа міцності) для деяких торсіонів зображені на рис. 5.

Видно, що матеріали, що мають пластичні компоненти у вигляді окремих фаз (наприклад, Cu в Fe-Cu-C), непридатні для виготовлення торсіонів. Із цього рисунка видно, що значення β у торсіона із карбіду кремнію на два порядки менше, ніж у торсіона із вольфраменійового сплаву ВР-27.

Вимірювання жорсткості торсіонів проводили також на установці, зображеній на рис.2.

Жорсткість W (г·см/рад) торсіона обчислювали за формулою:

$$W = \frac{0,004\pi^2 I}{T^2} \quad (5)$$

де I – момент інерції тіла маятника, г·см², T – період коливань, с.

В нашому експерименті значення I становить 2008,9 г·см², тому після підстановки цього значення в формулу 5, вона матиме вигляд:

$$W = \frac{82,6}{T^2} \quad (6)$$

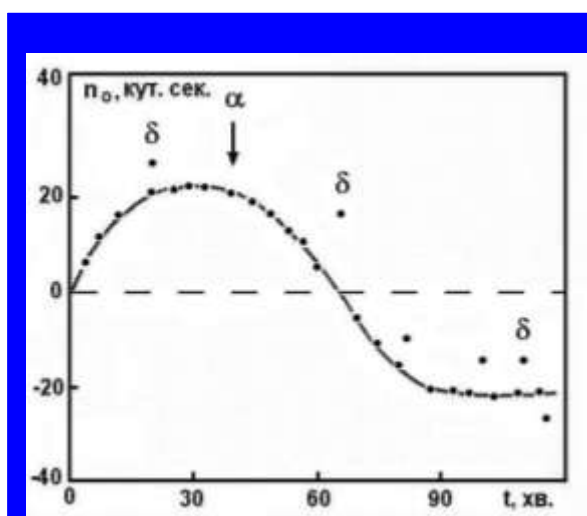


Рисунок 4 – Зміни в часі положення динамічної рівноваги маятника при несиметричному підігріві

Згідно з експериментом, значення жорсткості торсіонів із карбіду кремнію $W = 1 \pm 0,3$ г·см/рад.

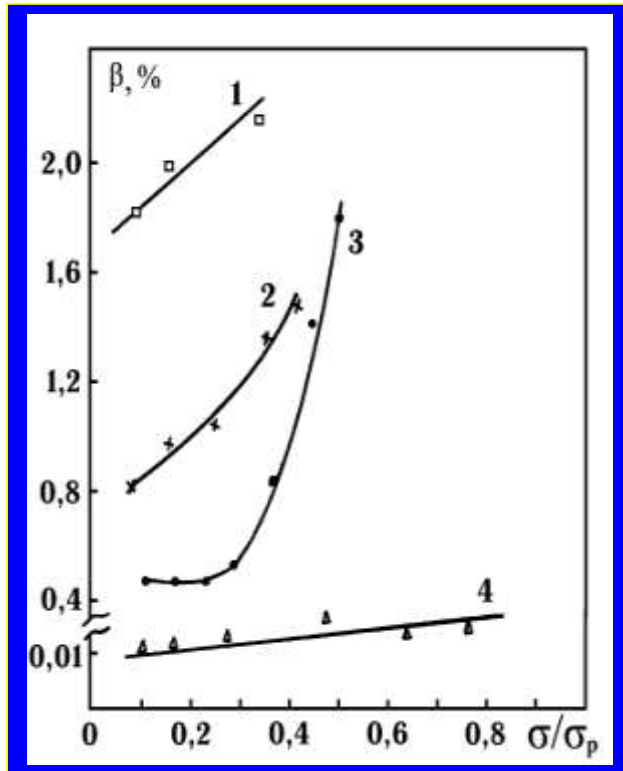


Рисунок 5 – Залежність величини не повернення в нуль від навантаження торсіонів із сплаву ВР-27 (1), плавленого кварцу (2), мікросхаруватого Fe-Cu-C (3) і SiC (4). Кут закручування і час витримки торсіонів відповідно дорівнюють 90 градусів і 60 хв

Висновки

1. Вперше виготовлені та досліджені торсіони із шаруватих волокон карбіду кремнію.

2. Нестабільність нульового положення торсіонів із карбіду кремнію в 10-15 разів менше, ніж у кварцевих і в 50-100 разів менше в порівнянні з торсіонними підвісами із сплаву ВР-27. Отже, розроблені і досліджені нами торсіони із волокнистого карбіду кремнію мають більш стабільні і можуть бути ефективно використані у відповідних приладах. В подальшому доцільно розробити та дослідити пружні чутливі елементи із карбіду кремнію у формі балок.

Література.

1. Техническая энциклопедия.- М: 1929. - Т5. - С.144.
2. Усатин П.Б. О расчете растяжек для подвижных частей электроизмерительных приборов // Измерительная техника, 1961.- №2.- С.32.
3. Новиков Н.Н., Копань В.С., Григорьев В.М. О ползучести в маломоментных торсіонах // Известия ВУЗов. Приборостроение, 1978.- Т.21.-4.-С.89.
4. Савицкий Е.М., Бурханов Г.С. Металловедение тугоплавких металлов и сплавов. - М.: Наука, 1967. - 315 с.
5. Дорохович В.П., Копань В.С., Силенко П.М. Некоторые механические свойства волокон карбида кремния // Порошковая металлургия, 1984.- №1.- С.55-59.
6. Гриневич Г.П., Копань В.С., Силенко П.М. и др. Испытание пружин из карбида кремния // Приборы и системы управления, 1988. - №12. - С.33.
7. Рево С.Л., Копань В.С., Силенко П.М. Упругие элементы приборов // Тез. докл. конференции "Наукоемкие технологии двойного назначения", Киев, 1994.- С.73-74.
8. Силенко П.М. Вплив відпалу на міцність неперервних волокон SiC різних модифікацій // Електронная микроскопия и прочность материалов. – Киев. – 2003. – Вып. 13. - С. 96-99.
9. Современные композиционные материалы / Под ред. Браутмана Л. и Крока Р. - М.: Мир, 1970. - 589 с.
10. Копань В.С. Композиційні матеріали, К: Пульсари, 2004. - 197 с.

<p>Силенко П.М., Копань В.С. Прецизионные торсионные пружины. В статье сообщается о результатах исследования торсионов, изготовленных из слоистых волокон карбида кремния. Нестабильность нулевого положения торсионного подвеса из карбида кремния, в 10-15 раз меньшая, чем у приборов с кварцевыми подвесами и в 50-100 раз меньшая, в сравнении с подвесами из сплава ВР-27. описана оригинальная установка для исследования торсионных пружин.</p>	<p>Sylenko P.M., Kopan' V.S. Precision torsion springs. Results of investigation of layered SiC fibers torsion springs are presented. Non stability of zero position of SiC torsion springs is 10-15 times less in comparison with quartz torsion springs and 50-100 times less in comparison with ВР-27 one. The device for torsion springs parameters testing is described too.</p>
---	---

*Надійшла до редакції
22 червня 2006 року*

УДК 621.839

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ РУХОМИХ ВУЗЛІВ

¹⁾Антонюк В.С., ²⁾Вовк В.Д., ²⁾Возненко В.В., ¹⁾Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна, ²⁾ВАТ "НВК "Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського, м. Київ, Україна

Розглянуто метод підвищення працездатності рухомих деталей вузлів формуванням на їх робочих поверхнях рельєфу з дискретно-орієнтованої топографію. Запропоновано вибір таких конструкційних параметрів робочих поверхонь, як щільність та глибини лунок, їх розміри та форма визначати з умов експлуатації, що забезпечує сприятливий баланс антифрикційності поверхні та її несучої здатності

Вступ

Розробка та освоєння нових видів продукції, покращення технічних і економічних показників, підвищення якості продукції – це засади, на яких базуються зростання продуктивності праці, економія матеріалів та енергії, зниження експлуатаційних витрат. Машини і прилади, які конструктивно однакові та виготовлені з однакових матеріалів, часто мають різну надійність. Причиною цього здебільшого є різні технології виготовлення їх деталей і передусім на фінішних операціях процесів, при яких формуються кінцеві властивості і стан робочих поверхонь, що визначають їх експлуатаційні показники.

Формування на робочих поверхнях деталей рухомих вузлів машин та приладів особливої топографії у вигляді закономірно розташованих лунок, які в процесі експлуатації заповнені антифрикційним матеріалом (мастилом, мастильною композицією, твердим мастильним матеріалом, полімерною пластмасою, тощо) і орієнтованих у напрямку руху елемента деформації пари тертя дозволить поліпшити такі експлуатаційні характеристики, як швидкодія, стабільність і точність параметрів, та підвищити надійність усуненням відмов через схоплення та заїдання. Відомо, що розташування лунок еліпсоїдного виду [1] та їх орієнтація і раціональна щільність їх нанесення забезпечують в режимі гідродинамічного те-