

## **ДЕЯКІ ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ УЩІЛЬНЮВАЧІВ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД**

### **Ч. I. Розробка ущільнювачів для гідротехнічних споруд з антифрикційним покриттям робочої поверхні; деякі теоретичні аспекти забезпечення заданих спеціальних властивостей покриття**

Рассмотрен вопрос актуальности разработки уплотнителей для гидротехники, а также основные факторы, обеспечивающие снижение коэффициента трения.

### **SOME THEORETICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT OF SEALANTS WITH AN ANTI-FRICTIONAL COVERING FOR HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS**

#### **Part 1. Development of sealants for hydraulic engineering constructions with an antifrictional covering of a working surface, some theoretical aspects of maintenance definite special properties of a covering**

The question of a urgency of development of sealants for hydraulic engineering, and also the major factors providing decrease of factor of friction is considered.

На поточний момент в Україні гостро стоїть проблема з забезпечення реконструкції діючих гідротехнічних споруд, а також тих об'єктів, що проектуються і будуються, гумотехнічними виробами (ГТВ) різного призначення.

Особливе місце серед всієї номенклатури ГТВ для цих об'єктів займають ущільнювачі вузлів з малим коефіцієнтом тертя. В світовій практиці проблема зниження граничної міжмолекулярної взаємодії в системах з використанням матеріалів, які відрізняються за природою, вирішуються різними шляхами: від зміни молекулярної будови і фізичного стану полімерного матеріалу до використання антифрикційних змазок і вживання покриттів різної природи і властивостей (тканинні покриття, модифікація поверхні хімічними сполуками і випромінюваннями різної природи та ін.).

Оскільки на поточний момент в Україні відсутнє виробництво ГТВ з низькими показниками антифрикційних властивостей для гідротехнічних споруд, виникла необхідність постановки роботи з розробки таких виробів, матеріалів та технологій їх виготовлення.

Сучасна гідротехніка підійшла до рубежу, коли можливості екстенсивного фактору розвитку вступають в протиріччя з глобальними проблемами енергозбереження і надійності. Рішення цих проблем і визначають стратегію розвитку галузі і базуються на безперервному підвищенні рентабельності виробництва.

Вимоги інтенсифікації виробництва в цій галузі тісно пов'язані з проблемою підвищення довговічності і надійності еластомерних ущільнювачів різних

вузлів гідротехнічних споруд (затворів, шлюзів, доків, тощо). При цьому задачі загальної глобалізації галузі вимагають системного підходу до визначення рентабельності таких об'єктів. Так, наприклад, чітко встановлено, що фактором, який обумовлює економічність, є не ціна ущільнювача, а вартість вузла в цілому, яка складається також з витрат на періодичні зупинки, які необхідні для виконання ремонтних робіт, втрат частини виробленої продукції у вигляді енергії і послуг на виробництво і обслуговування об'єктів. Окремий фактор, який не підпадає під вимоги рентабельності, є забезпечення абсолютної надійності гідротехнічних споруд під час екстраординарних випадків – паводків, техногенних і природних катастроф, при яких фактор надійності превалює над рентабельністю.

Згідно з викладеним, на передній план для підвищення надійності експлуатації вузлів гідротехнічних споруд виступає проблема забезпечення їх герметичності, яка тісно пов'язана з досягненням мінімального коефіцієнту тертя між поверхнею еластомерного ущільнювача і металевою контактною поверхнею вузла як в умовах сухого тертя, так і тертя зі змащенням.

Рішення цієї проблеми дозволить:

- по-перше, суттєво підвищити надійність роботи вузла тертя за рахунок виключення відмов гумових ущільнювачів, які пов'язані зі стиранням полімерної поверхні,
- по-друге, знизити адгезійні властивості поверхонь пари гума-метал і, відповідно, зменшити механічні втрати на приведення механізму в дію і зусилля ковзання цієї пари в процесі підняття і опускання затвору, особливо під тиском великого перепаду води. При цьому зменшення цих зусиль дозволяє понизити витрати електроенергії, яка споживається електродвигунами механізмів, і замінити їх на двигуни меншої потужності.

Зниження коефіцієнту тертя в згаданій парі може вирішуватись різними шляхами. Один з них – це модифікація металевих поверхонь шляхом використання легованих сталей, що на даний момент для гідротехнічних споруд пов'язано з великими витратами і труднощами. Тому очевидним стає той факт, що основна увага повинна бути спрямована на покращення властивостей поверхонь гумових ущільнювачів, бо їх легше і дешевше замінити, ніж металеві конструкції.

Таким чином, проблема зниження коефіцієнту тертя між поверхнями в системі: гумовий ущільнювач – металева конструкція затворів, є достатньо привабливою для дослідників, навіть якщо вона буде вирішуватись за рахунок деякого підвищення вартості еластомерних елементів ущільнювального вузла.

В процесі вивчення впливу різних чинників на експлуатаційні характеристики еластомерних матеріалів в контакт з металевою поверхнею механічних з'єднань, що рухаються, встановлено, що з появою полімерних матеріалів питання, які пов'язані з їх тертям по твердих поверхнях, розглядаються з точки зору отриманих раніше результатів з досліджень тертя матеріалів. Показано, що до процесів тертя полімерів дійсно можуть бути віднесені деякі важливі зако-

номірності, які отримані при дослідженні металів, хоча за фізико-механічними властивостями ці матеріали суттєво відрізняються [1-3].

Для металевих пар основна характеристика процесу тертя двох поверхонь – сила тертя, визначається взаємодією цих поверхонь по площині істинного, чи фактичного контакту. Вона є функцією тиску, швидкості ковзання, температури, тривалості контакту і інших параметрів. Дослідники частіше вживають параметр – коефіцієнт тертя ( $f$ ), який визначається відношенням сили тертя до нормальної навантаження.

По прийнятій класифікації існує декілька основних режимів тертя, які визначаються станом твердих поверхонь [4]:

1) тертя по ювелірним поверхням коли між поверхнями відсутня проміжна фаза. При цьому  $f$  набуває найбільшого значення, а тертя часто супроводжується адгезійним зв'язком поверхонь і їх «заїданням»;

2) тертя чистих поверхонь. Коефіцієнт тертя чистих поверхонь досить значний і залежить від типу і властивостей кисневої плівки;

3) перехідне граничне тертя, що спостерігається в випадках тонкого шару третьої фази (змазки), який розділяє тверді поверхні. Цей тип залежить від багатьох факторів і є найбільш складним процесом зовнішнього тертя;

4) рубіжне гідродинамічне тертя займає область між граничним і гідродинамічним;

5) гідродинамічне тертя спостерігається при наявності між поверхнями проміжного шару змазки, відповідає законам гідродинаміки потоку рідини і залежить від її в'язкості.

Для широко класу матеріалів практичне значення має поняття тертя покою. Сила тертя спокою визначається граничною силою тертя, яка необхідна для виводу тіла із стану спокою і приведення його в стан руху [5].

Особливу групу матеріалів становлять полімерні матеріали, які за своїми фрикційними властивостями мають ряд загальних закономірностей з металами, але при цьому суттєво від них відрізняються. При цьому слід відрізнити полімери в склоподібному і високоеластичному станах, модуль пружності яких відрізняється на декілька порядків.

Механічні характеристики твердих полімерів мають виражений релаксаційний характер природи і механізму тертя. При звичайних умовах молекули склоподібних полімерів характеризуються малою рухомістю, при цьому деформаційні властивості суттєво залежать від напруги. Вказана особливість визначає ряд специфічних властивостей зовнішнього тертя твердих полімерів.

Процесу вивчення тертя полімерів в склоподібному і кристалічному станах приділена увага багатьох вчених. Тейлор з співробітниками показав [6,7], що в ряду досліджених полімерів: плексиглас, політрифторетилен, поліетилен НТ, фторопласт-4, для перших трьох полімерів значення коефіцієнта тертя більше, ніж того вимагає теорія. Це пов'язано з підвищенням опору адгезійних зв'язків, які є результатом дії в зоні контакту великих локальних напруг. При цьому опір зв'язків на руйнування на поверхні перевищує опір на руйнування в об'ємі пластика, як того вимагає теорія. Фторопласт при цьому характеризується самим

низьким значенням коефіцієнта тертя. Дослідження деформаційної і адгезійної складових сили тертя ряду полімерів теж показали перевагу фторопласту-4 [8,9]. Так, відношення адгезійної і деформаційної складових сили тертя для полімерів складає: фторопласт-4 – 0,025, капрон – 0,06, поліетилен – 0,032. Таке відхилення співвідношення для фторопласта-4 пов'язано з дуже низькою адгезією його до металу і переходом процесу руйнування на межу розподілу пластик – тверде тіло.

Крім цього було встановлено, що ступінь адгезійної і деформаційної складових сили тертя суттєво залежить від шорсткості поверхонь, площини контакту, швидкості ковзання, тривалості релаксації і геометрії контакту. Знайдено такі значення тривалості релаксації для ряду полімерів: полістирол –  $9,8 \cdot 10^{-4}$ , фторопласт-4 –  $1,5 \cdot 10^{-4}$ , фенольна смола –  $3,7 \cdot 10^{-4}$  хв. [10]. Весь комплекс проведених досліджень показав, що фрикційні характеристики полімерів визначаються їх деформаційними властивостями в зоні контакту. При цьому втрати при терті для більшої кількості режимів тертя обумовлені в основному механічними втратами в самих полімерах.

Особливість природи тертя полімерів у високоеластичному стані зумовлена великою рухомістю полімерних ланцюгів. Теоретичною основою і інтерпретацією цих особливостей є молекулярно-кінетичні уявлення про рухомість молекул полімеру на границі контакту з твердим тілом. Дослідження з цієї проблеми рядом вчених дозволило встановити, що швидкість ковзання таких полімерів являється експоненціальною функцією тангенціальної сили [11]:

$$V = B \exp\left(-\frac{U - \gamma F}{kT}\right),$$

де  $B$  – константа;

$kT$  – фактор Больцмана;

$U$  – енергія активації процесу тертя;

$\gamma F$  – робота тертя;

$F$  – тангенціальна сила, яка дорівнює протилежно направлений силі тертя.

При цьому було зроблено припущення, що механізм тертя високоеластичних матеріалів є молекулярно-активаційний по аналогії з в'язкою течією. Це припущення лежить в основі молекулярно-кінетичної теорії зовнішнього тертя високоеластичних полімерів [12]. Використання основ цієї теорії дозволило пояснити багато результатів експериментальних досліджень тертя еластомерних матеріалів при підвищених температурах, різних швидкостях, низького тиску і по різних поверхнях. Але вона не допомогла оцінити фрикційні властивості еластомерів в зоні низьких температур, а також експериментальні дані з екстремального характеру залежності сили тертя від температури і швидкості ковзання [13]. Це свідчить про те, що молекулярно-кінетична теорія є вірною тільки в області відносно великої рухомості молекулярних ланцюгів.

Характеристики антифрикційних властивостей полімерів у високоеластичному стані залежать не тільки від температури. Вони тісно пов'язані зі станом поверхні, площини фактичного контакту, швидкості ковзання, нормального навантаження та інших чинників [14-18].

Дослідженнями встановлено, що деякі властивості еластомерів (природа полімеру, характер поверхні, напружений стан) по різному впливають на показники опору тертя. Так, для еластомерних матеріалів на основі СКН-40, СКН-26, СКН-18 модуль пружності при одноосному стисканні складає 23, 20 і 17 кГ/см<sup>2</sup>, відповідно, а екстремальні значення відносної величини поверхні фактичного контакту становлять 0,54; 0,61 і 0,73 [19]. При цьому показано, що повна поверхня контакту не може бути досягнута з причини наявності мікропор і пухирів повітря на поверхні гум [20].

В режимі тертя, який вже установився, основні показники процесу тертя гум при навантаженнях вище ніж 250 кГ/см<sup>2</sup> практично не залежать від навантаження [21, 22]. В інтервалі (400÷500) кГ/см<sup>2</sup> спостерігається зміна характеру цієї залежності, а в області тиску більше 800 кГ/см<sup>2</sup> – досить різке збільшення сили тертя зі зростанням тиску. При низькому тиску (10÷200) кГ/см<sup>2</sup> превалюючим фактором є зміна поверхні фактичного контакту [23].

Поверхня контакту залежить також від типу еластомеру, який визначає міжмолекулярну взаємодію. Крім цього, вона пов'язана, також, з типом і кількістю інгредієнтів, які впливають на твердість матеріалу. Із зростанням жорсткості гуми сила тертя падає. Дослідження впливу наповнювачів на фрикційні властивості гум свідчать про тісний зв'язок між механічними властивостями матеріалів і коефіцієнтом тертя. При цьому природа еластомеру визначає адгезійний зв'язок, а кількість наповнювача – жорсткість гуми. Однак, механічні показники полімеру впливають на його фрикційні властивості лише опосередковано, через гістерезисні характеристики самого матеріалу [24]. Всі ці фактори взаємопов'язані між собою і можуть діяти в протилежному боці на кінцевий результат. Наприклад, підвищення полярності полімеру збільшує модуль пружності, а коефіцієнт тертя в першу чергу визначається типом еластомеру.

Таким чином, в результаті аналізу літературних даних встановлено наступне: при виборі матеріалів для пар тертя в першу чергу слід враховувати той факт, що зниження коефіцієнту тертя забезпечується, в основному, шляхом зменшення адгезії пари полімер-метал. Для досягнення цієї мети використовують модифікацію поверхонь, що труться. Ефективним методом підготовки поверхні є її фторування, тому що воно сильно зменшує адгезію пари тертя без зміни об'ємних і конструкційних властивостей.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Greenwood J., Taborg D. // Proc. Roy. Soc. – 1958. – 71. – P. 462.
2. Дерягин Б.В., Ратне С.Б., Футран М.Ф. // ДАН СССР. – 1953. – 92. – С. 1137.
3. Novell H. // Text J., Res. – 1953. – N 8. – P. 23.
4. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963.
5. Дерягин Б.В. Что такое трение. М.: Изд. АН СССР, 1963.
6. Shooter R., Taborg D. // Proc. Phy. Soc. – 1952. – B65. – P. 661.
7. King R., Taborg D. // Proc. Phy. Soc. – 1953. – B66, N9.
8. Истомин Н.П., Курицына А.Д. // Машиностроение. – 1965. – №1. – С. 104.
9. Курицына А.Д., Мейснер П.Г. // Пластмассы как антифрикционные материалы». – М.: Изд. АН СССР, 1961.
10. Tanaka K.J. // Phy. Soc. Jap. – 1961. – 16, N60. – P. 2003.
11. Schallamach A. // Proc. Phy. Soc. – 1953. – B66. – P. 386.

12. Бартенев Г.М. // ДАН СССР. – 1954. – 96. – С. 1161.
13. Бартенев Г.М., Стыран З.Е. // ВМС. – 1959. – 1, №7.
14. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В., Константинова Н.А. // Механика полимеров. – 1967. – №4. – С. 439.
15. Лаврентьев В.В., Острейко К.К. // Механика полимеров. – 1967. – №6. – С. 1125-1139.
16. Лаврентьев В.В. // ВМС. – 1962. – 4, №8. – С. 1151.
17. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1952.
18. Корневская Н.С., Лаврентьев В.В. и др. // ВМС. – 1960. – № 8 – С. 1247.
19. Острейко К.К. Автореф. дисс. – НИФХИ, 1970.
20. Толстой Д.М. // ДАН СССР. – 1953. – 90, №5.
21. Бартенев Г.М. // ДАН СССР. – 1955. – 103. – С. 1017.
22. Лаврентьев В.В. // ДАН СССР. – 1957. – 115. – С. 1957.
23. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. и др. // ВМС. – 1971. – А13, №10. – С. 2354.
24. Taborg D. // Rubb.Chem. and Technol. – 1952. – 33, N1. – P. 142.

УДК 678.074.06

Хорольський М.С., Бахмат В.О., Сабініна Л.А.,  
Кіпкало І.В.

## **ДЕЯКІ ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ УЩІЛЬНЮВАЧІВ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД**

### **Ч. II. Розробка ущільнювачів для гідротехнічних споруд з антифрикційним покриттям робочої поверхні; проблема кріплення фторопластового шару до поверхні гумового виробу.**

Проведены исследования по повышению надежности крепления антифрикционной фторопластовой ленты к резине специальной обработкой их поверхностей.

### **SOME THEORETICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT OF SEALANTS WITH AN ANTIFRICTIONAL COVERING FOR HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS**

#### **Part 2. Development of sealants for hydraulic engineering constructions with an antifrictional covering of a working surface; a problem of fastening fluorin-plate a layer up to a surface of a rubber product**

Are carried out researches on increase of reliability of fastening antifrictional fluorin-plate plates to rubber by special processing of their surface.

Питання підвищення надійності і довговічності вузлів тертя гідротехнічних споруд набуває все більшого значення. Ця проблема вирішується як за рахунок створення нових конструкційних матеріалів, так і використання відомих полімерів і спеціальних добавок, що забезпечують отримання необхідного комплексу трибологічних, фізико-механічних та інших експлуатаційних характеристик. В результаті аналізу літературних даних встановлено наступне: при виборі матеріалів для пар тертя в першу чергу слід враховувати той факт, що зниження коефіцієнта тертя забезпечується, в основному, шляхом зменшення адгезії пари полімер-метал. Для досягнення цієї мети використовують модифікацію поверхонь, що труться. Ефективним методом підготовки поверхні є її фторування,