

М.Ю. Думанчук, Н.В. Тарельник, В.О. Пирогов

Сумський національний аграрний університет

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ГНУЧКИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРУЖНИХ МУФТ ВІД ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

В роботі розглянута проблема захисту поверхонь гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії. Запропоновано вдосконалення технології захисту пружних елементів від фретинг-корозії. Для підвищення фретингостійкості пружних елементів запропоновано використання металоплакуючих мастильних матеріалів на основі парафіну з додаванням порошку дисульфиду молибдену та графіту. Визначено раціональний склад мастильного матеріалу, що включає графіт та дисульфід молибдену у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожного. Збільшення стійкості проти фретинг-корозії підтверджується значним зниженням показників шорсткості R_a , R_z , R_{max} поверхонь тертя. Запропонована технологія відрізняється низькою собівартістю за рахунок застосування простого і дешевого обладнання, можливістю механізації роботи.

Ключові слова: пружна муфта, фретинг-корозія, поверхня, шорсткість, металоплакування, графіт, зношування

М.Ю. Думанчук, Н.В. Тарельник, В.А. Пирогов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ГИБКИХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГИХ МУФТ ОТ ФРЕТИНГ-КОРРОЗИИ

В работе рассмотрена проблема защиты поверхностей гибких элементов упругих муфт от фретинг-коррозии. Предложено усовершенствование технологии защиты упругих элементов от фретинг-коррозии. Для повышения фретингостойкости упругих элементов предложено использование металлоплакирующих смазочных материалов на основе парафина с добавлением порошка дисульфида молибдена и графита. Определен рациональный состав смазочного материала, включающий графит и дисульфид молибдена в количестве от 5 до 25 весовых процентов каждого. Увеличение стойкости против фретинг-коррозии подтверждается значительным снижением показателей шероховатости R_a , R_z , R_{max} поверхностей трения. Предлагаемая технология отличается низкой себестоимостью за счет применения простого и дешевого оборудования, возможностью механизации работы.

Ключевые слова: упругая муфта, фретинг-коррозия, поверхность, шероховатость, металлоплакирование, графит, износ

M. Dumanchuk, N. Tarelnyk, V. Pirogov

IMPROVEMENT OF ELASTIC COUPLINGS FLEXIBLE ELEMENTS FRETTING CORROSION PROTECTION TECHNOLOGY

The problem of elastic couplings flexible elements surfaces fretting corrosion protection is considered in the work. Advanced fretting corrosion protection technology is proposed. To increase the elastic elements fretting resistance, the use of metal-clad lubricants based on paraffin with the addition of molybdenum disulfide powder and graphite is proposed. The rational composition of the lubricant, including graphite and molybdenum disulfide in the amount of 5 to 25 weight percent each, has been determined. The increase of fretting corrosion resistance is confirmed by a significant decrease of friction surfaces roughness parameters (R_a , R_z , R_{max}). The proposed technology is low cost due to the use of simple and cheap equipment, the possibility of mechanization.

Keywords: elastic coupling, fretting corrosion, surface, roughness, metal plating, graphite, wear

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасному насосному і компресорному машинобудуванні широко використовуються пружні муфти з гнучкими елементами для передачі крутного моменту від приводу на енергетичний агрегат [1]. Їх основними перевагами, у порівнянні з традиційними зубчастими і втулично-пальцевими муфтами, є значні компенсуючі можливості в плані радіальних неспіввісностей і перекосів валів приводу і агрегату, незначних осьових і радіальних реактивних сил; пружні муфти безшумні в роботі, не вимагають мастила і обслуговування в процесі експлуатації. Однак недоліком їх конструкції, а отже, і способу виготовлення, є схильність поверхонь гнучких елементів до фретинг-корозії. Традиційним способом формування пакета гнучких елементів пружних муфт є спосіб, що включає виготовлення гнучких елементів і подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням [2]. Аналіз випадків втрати працездатності пакетів гнучких елементів пружних муфт показує, що, незважаючи на успішне вирішення оптимізаційних задач в галузі проектування пружних муфт, зокрема вирішення задач оптимізації геометричної форми, напружено-деформованого стану гнучкого елемента, міцності,

мінімізації маси, а також кутової і осьової жорсткості, недоліком таких способів є те, що гнучкі елементи муфт схильні до фретинг-корозії, яка у найвищій мірі проявляється в місцях жорсткого защемлення кріпильними елементами. Ураження фретинг корозією має велику небезпеку, оскільки може бути первопричиною втомного руйнування пружних елементів і, у кінцевому підсумку, виходу муфти з ладу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існує спосіб формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів і подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням, у якому перед складанням на сполучні поверхні гнучких елементів наносять металоплакувальний мастильний матеріал, принаймні, в місцях їх механічного кріплення при формуванні пакета, а після складання пакет здавлюють, видаляючи надлишок металоплакувального мастильного матеріалу [3]. У результаті нанесення металоплакувального мастильного матеріалу на сполучні поверхні гнучких елементів перед їх складанням у пакет, принаймні, в місцях їх механічного кріплення, наступного здавлювання пакета після складання з подальшим видаленням надлишків металоплакувального мастильного матеріалу, може реалізуватися ефект безізносності, який проявляється у тому, що на деталях, які труться одна об одну під час роботи вузлів тертя, формується тонка і така, що важко піддається окисленню, захисна самовідновлювальна металева плівка із введених у металоплакувальний мастильний матеріал присадок у вигляді поверхнево-активних речовин, порошкоподібних металів, їх оксидів і т.п., причому товщина плівки становить від декількох атомних шарів до 1-2 мкм. Підвищена ефективність металоплакувального мастильного матеріалу обумовлена наявністю контакту поверхонь тертя через м'який і тонкий шар металу, що пластично деформується, більш ефективною реалізацією ефекту Ребіндера, перенесенням частинок зносу з однієї поверхні тертя на іншу і утриманням частинок у зоні контакту електричним полем [4]. Нанесення металоплакувального мастильного матеріалу, що складається з парафіну з додаванням порошку з міді, забезпечує практично повну безізносність поверхонь гнучких елементів, завдяки зашпаковуванню мікронерівностей поверхонь заготовок і збільшенню площі їх фактичного контакту, а також зниженню коефіцієнта тертя, що, в кінцевому підсумку, значно знижує силу тертя, а значить, ймовірність руйнування і знос контактуючих поверхонь. Найбільш раціональним процентним вмістом металоплакувальної присадки з міді є 5-25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення процентного вмісту присадки не впливає на якість мастила. Слід зазначити, що випробування, що демонструють досягнення позитивного ефекту, пов'язаного з поліпшенням якості пакетів гнучких елементів пружних муфт, виготовлених відповідно до одного із способів з рівня техніки, проводилися на стенді, при амплітуді вигину 2 мм і з кількістю циклів 10^7 [5].

Однак, наступними дослідженнями було встановлено, що при збільшенні амплітуди до 5 мм і кількості циклів до 2×10^7 знос поверхонь гнучких елементів значно зростає, причому більшою мірою не в зоні кріплення, а на ділянках, віддалених від неї, де поверхні, що контактують, при переміщенні проходять великі відстані відносно одна одної. При розкладанні після випробувань пакета гнучких елементів на їх поверхнях було зазначено появу слідів зносу в результаті фретинг-корозії. Продукти зносу, що з'являлися після більш тривалих випробувань, перебуваючи у замкнутому просторі між поверхнями гнучких елементів, шаржували їх і сприяли появі кратерів на окремих поверхневих ділянках.

З огляду на зазначене вище, було створено спосіб, який забезпечив більш надійний захист гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії і підвищив їх довговічність у більш жорстких умовах експлуатації за рахунок зміни якісних параметрів їх поверхневих шарів шляхом нанесення корозійностійких мастильних матеріалів [6]. У зазначеному способі формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, нанесення на їх сполучні поверхні попередньо приготованого металоплакувального мастильного матеріалу, до складу якого входить парафін з додаванням порошку міді, і подальше їх складання у пакет з механічним кріпленням, при приготуванні металоплакувального мастильного матеріалу до його складу додатково додають порошок дисульфіді молібдену. Порошок міді і порошок дисульфіді молібдену додають у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожний. Приготований металоплакувальний мастильний матеріал можуть наносити на сполучні поверхні кожного гнучкого елемента в межах 20-30 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета шляхом натирання при кімнатній температурі або шляхом занурення в розплав

металоплакувального мастильного матеріалу. Відома позитивна роль дисульфиду молібдену (MoS_2), що застосовується як тверде мастило, у вирішенні загальної проблеми підвищення надійності і довговічності машин і механізмів. Так, у роботі [7] відзначається, що за класифікацією, запропонованою Кемпбелом, дисульфід молібдену належить до групи твердих мастил, кристалічна решітка яких має шарувату структуру. Атоми кожного шару пов'язані між собою міцними хімічними зв'язками, при цьому окремі шари зв'язані між собою слабкими молекулярними силами, що забезпечує легкість ковзання по площині спайності. Товщина одного елементарного шару MoS_2 дорівнює $6,25 \text{ \AA}$. Плівка дисульфиду молібдену товщиною $0,025 \text{ мкм}$ складається з 40 шарів з 38 площинами ковзання між ними. Висока адгезія дисульфиду молібдену до металів обумовлена міцними молекулярними зв'язками, утвореними атомами сірки з металом; будова кристалічної решітки забезпечує наявність важливих для мастильних матеріалів високих адгезійних властивостей. У роботі [8] відзначається, що хороші результати дає застосування дисульфиду молібдену як наповнювача в мастилах, які запобігають фретинг-корозії. Для визначення впливу покриттів з дисульфиду молібдену на фретинг-корозію гнучких елементів пружних муфт проводилися додаткові дослідження. У результаті, було встановлено, що додавання до мастильного матеріалу, що складається з парафіну і порошку міді в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, порошку дисульфиду молібдену в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, значно знижує знос поверхонь гнучких елементів пружних муфт.

Недоліком прототипу є тривалий період припрацювання, який, згідно з [9] становить 10^7 циклів, що при роботі вісім годин на добу відповідає приблизно 14 діб.

Відповідно до [10], знос поверхонь тертя при експлуатації відбувається постійно, починаючи з роботи з'єднання, але протікає нерівномірно. У спеціальній літературі розрізняють три періоди зносу: первинний (припрацювання), нормальний (експлуатаційний), катастрофічний знос (рис. 1).

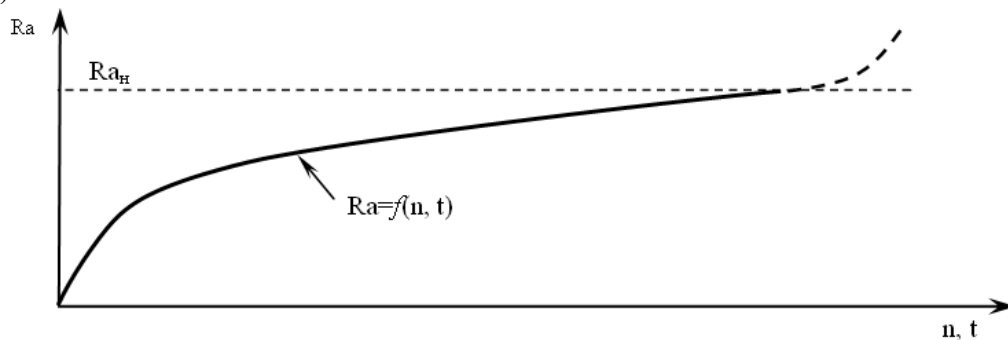


Рис. 1. Залежність зносу гнучких елементів від числа циклів (часу роботи)

У роботі [11], відмічається, що знос гнучких елементів при фретинг-корозії відбувається по експоненціальній залежності (період припрацювання, встановлений знос, який закінчується катастрофічним зносом).

Професор Суслов зазначає, що процес експлуатації деталі можна розглядати як продовження технології її обробки [12]. Тому для підвищення довговічності пар тертя необхідно максимально зменшити їх припрацювання при експлуатації.

Крім того, у прототипі запропоновано приготований металоплакувальний мастильний матеріал наносити на сполучні поверхні кожного гнучкого елемента в межах $20\text{--}30 \text{ мм}$ від місця його механічного кріплення при формуванні пакета. Це може бути доцільним щодо муфт, діаметр яких не перевищує $200\text{--}210 \text{ мм}$. Для муфт, діаметр яких більше, цього недостатньо, тому що зі збільшенням діаметру муфти збільшується відстань, як між кріпильними отворами, так і між кріпильним і центральним отворами.

Слід відмітити, що муфти з гнучкими елементами при роботі в умовах виробництва повинні витримувати значно триваліший час до появи слідів зносу.

До цього слід додати, що муфти з гнучкими елементами працюють, як правило, в важких умовах оточуючих середовищ (вологість, пар, наявність у повітрі слідів кислоти або луги і таке інше), що значно збільшує зношування їх поверхонь.

Таким чином, проблема підвищення довговічності гнучких елементів в більш жорстких умовах експлуатації не втратила своєї актуальності.

В основу технічного рішення, що заявляється, поставлено задачу створення способу, який би забезпечив більш надійний захист гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії і

підвищив їх довговічність в більш жорстких умовах експлуатації за рахунок покращення якісних параметрів їх поверхневих шарів шляхом нанесення корозійностійких мастильних матеріалів. Поставлена задача вирішується тим, що у способі формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, нанесення на їх сполучні поверхні попередньо приготованого металоплакувального мастильного матеріалу, до складу якого входить парафін з додаванням порошку міді і дисульфиду молібдену у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожний, і подальше їх складання у пакет з механічним кріпленням, згідно з технічним рішенням, що заявляється, при приготуванні металоплакувального мастильного матеріалу додатково додають порошок графіту у кількості від 5 до 25 вагових відсотків. Приготований металоплакувальний мастильний матеріал можуть наносити на сполучні поверхні кожного гнучкого елемента в межах 10-50 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета.

Відома позитивна роль графіту, що застосовується як тверде мастило, у вирішенні загальної проблеми підвищення надійності і довговічності машин і механізмів.

Згідно [13] графіт збільшує площу контакту поверхонь за рахунок заповнення всіх мікронерівностей. Це зменшує коефіцієнт тертя (покращує антифрикційні властивості), збільшує несучу здатність. Завдяки графітовій добавці, матеріал краще протистоїть навантаженням, довше тримається на ділянках підвищеного тертя вузлів, а також набуває інших переважних характеристик. наприклад: водостійкість, захист вузлів від іржі; колоїдна стабільність; забезпечення плавного ходу механізмів та швидкого притирання деталей; оптимальне співвідношення ціни та ефективності; вибухобезпечність; невисока концентрація летких речовин (за високих температур випаровування не відбувається).

У роботі [14] відмічається, що графіт – це відмінний антифрикційний наповнювач, тому графітне мастило ідеально підходить для обслуговування великих та малих механізмів. Область застосування графітових мастил велика. Як правило, їх використовують для обслуговування вузлів та механізмів, що працюють при великих навантаженнях – у нафтовидобувній, автомобільній, будівельній, сільськогосподарській техніці.

У роботі [15] відмічається, що порошок міді значно покращує експлуатаційні властивості класичного графітного мастила. До особливостей складу мідно-графітного мастила відносять: здатність працювати при високих температурах; здатність витримувати високі механічні навантаження; підвищений рівень адгезії та липкості; повне виключення корозійних утворень на поверхнях, що захищаються; стійкість до дії олії та вологи; до складу мастила не входять свинець, нікель та сірка.

Таким чином, мідно-графітне мастило ефективно захищає робочі поверхні навіть в екстремальних умовах експлуатації. Найчастіше цим засобом обробляють різьбові з'єднання, перш ніж з'єднати їх. Це дає можливість надалі легко відкрутити з'єднання.

В роботі [14] показана синергетична взаємодія між графітом та дисульфідом молібдену (MoS_2). Вона заснована на заміщенні слабких сторін однієї речовини сильними за рахунок іншої. Так, графіт погано проявляє себе у сухому середовищі і незадовільно – в інертних газах. Дисульфід молібдену, у свою чергу, проявляє слабкі властивості у вологому середовищі. При з'єднанні порошоків графіту та дисульфиду молібдену виходить суміш, що значно перевершує за характеристиками кожен із цих матеріалів окремо.

Постановка завдання.

Таким чином, **метою** роботи є вдосконалення технологічного методу підвищення стійкості проти фретинг-корозії поверхонь гнучких елементів пружної муфти шляхом застосування металоплакуючих графітовмісних мастильних матеріалів та визначення їх раціонального складу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Пружна муфта (рис. 2) складається з двох напівмуфт 1, 5 і гнучких елементів 2, 4, розділених проставкою 3. Гнучкі елементи (рис. 3) виконані у вигляді пакетів кільцевих металевих мембран заводського складання. Матеріалом для виготовлення гнучких елементів муфт служить корозійностійка холоднокатана сталь 12Х18Н9, ГОСТ 4986-79.

Дослідження впливу вмісту порошку дисульфиду молібдену на інтенсивність зношування виконувалось в наступній послідовності. У розплавлений парафін при інтенсивному перемішуванні вводили порошок з міді у кількості від 5 до 25 вагових відсотків, порошок

дисульфиду молібдену - у кількості від 5 до 25 вагових відсотків і порошок графіту (С-0) - у кількості від 5 до 25 вагових відсотків з наступним охолодженням до кімнатної температури.

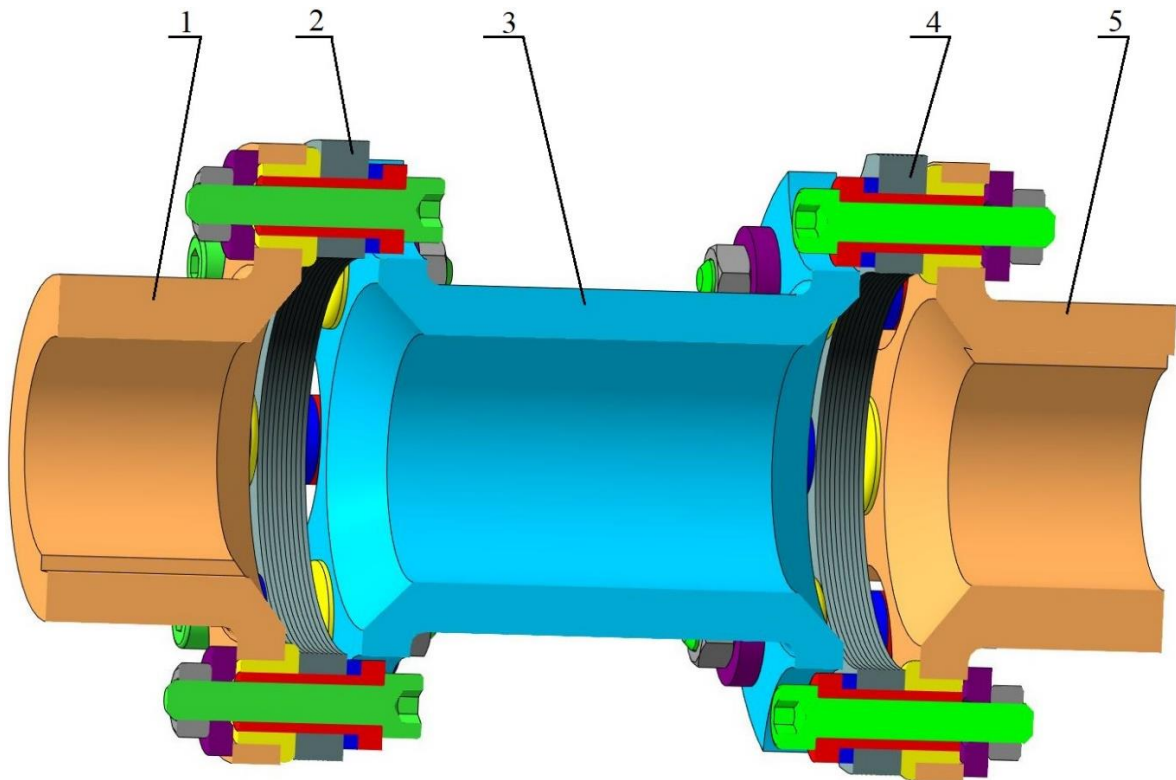


Рис. 2. Схема будови пружної муфти: 1, 5 – півмуфти, 2, 4 – пакети пружних елементів, 3 – проставка.

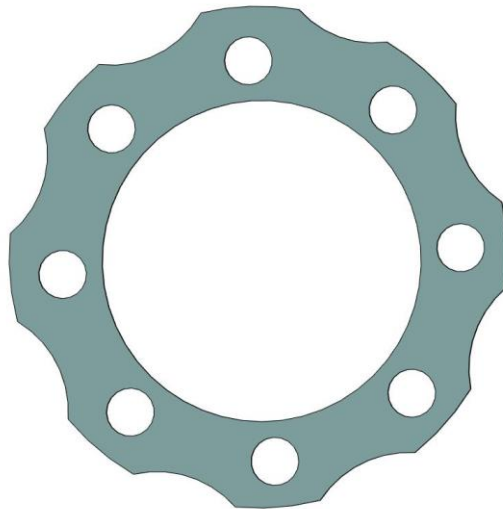


Рис. 3. Схематичне зображення гнучкого елемента

Отриманим матеріалом натирали заготовки гнучких елементів пружних муфт по всіх сполучних поверхнях кожного гнучкого елемента, принаймні, у межах 10-50 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета. Далі заготовки складали в пакет. Надлишок матеріалу покриття видаляли шляхом здавлювання пакета заготовок при температурі плавлення парафіну. При цьому відбувалося як би зашпаклювання мікронерівностей поверхні зі збільшенням площі фактичного контакту. Далі пакет обробляли за традиційною технологією. Величину зносу вимірювали профілографами-профілометрами: моделі 252 і моделі DIAVITE DH-5 за трьома параметрами (R_a , R_z і R_{max}). Вимірювання проводилися поперек напрямку прокату. База вимірювань становила 4 мм. Вихідна шорсткість гнучких елементів муфт зі сталі 12X18H9 (ГОСТ 4986-79) становила: $R_a = 0,16$ мкм; $R_z = 1,4$ мкм і $R_{max} = 1,7$ мкм.

Для випробувань складали пакет з гнучких елементів муфти МСК-470, розрізаних навпіл. Як матеріал покриття використовували парафін з добавками з міді, дисульфиду молібдену і

графіту. Приготування мастильного матеріалу здійснювалося наступним чином. У розплавленій парафін при інтенсивному перемішуванні вводили порошок з міді дисульфиду молібдену і графіту. Отриманий матеріал наносили на поверхні заготовок гнучких елементів муфти, принаймні, у межах 10-50 мм від місця їх механічного кріплення при формуванні пакета. При цьому використовували наступні серії покриттів, виконаних у співвідношеннях:

- 1-й пакет - без покриття;
- 2-й пакет - 25 % мідь + 25 % MoS₂ + 50 % парафін;
- 3-й пакет - 5 % мідь + 5 % MoS₂ + 5 % графіт + 85 % парафін;
- 4-й пакет - 5 % мідь + 5 % MoS₂ + 25 % графіт + 55 % парафін;
- 5-й пакет - 5 % мідь + 5 % MoS₂ + 50 % графіт + 40 % парафін;
- 6-й пакет - 25 % мідь + 25 % MoS₂ + 5 % графіт + 45 % парафін;
- 7-й пакет - 25 % мідь + 25 % MoS₂ + 25 % графіт + 25 % парафін;
- 8-й пакет - 20 % мідь + 20 % MoS₂ + 50 % графіт + 10 % пар;
- 9-й пакет - 30 % мідь + 30 % MoS₂ + 30 % графіт + 10 % парафін.

Потім заготовки складали у пакет. Надлишок матеріалу покриття видаляли шляхом здавлювання заготовок при температурі плавлення парафіну. Результати досліджень наведені у таблиці 1. Результати вимірювання шорсткості поверхонь гнучких елементів пружних муфт, пошкоджених фретинг-корозією (амплітуда 5 мм, кількість циклів 2×10^7)

Табл. 1

Результати досліджень

№	Матеріал поверхонь контакту	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
1	сталь 12X18H9	1,63	6,25	7,19
2	25% мідь + 25% MoS ₂ + 50% парафін	0,26	2,13	2,93
3	5% мідь + 5% MoS ₂ + 5% графіт + 85% парафін	0,28	2,50	3,11
4	5% мідь + 5% MoS ₂ + 25% графіт + 55% парафін	0,25	2,42	3,05
5	5% мідь + 5% MoS ₂ + 50% графіт + 40% парафін	0,23	2,45	3,09
6	25% мідь + 25% MoS ₂ + 5% графіт + 45% парафін	0,18	2,03	2,63
7	25% мідь + 25% MoS ₂ + 25% графіт + 25% парафін	0,13	1,84	2,27
8	20% мідь + 20% MoS ₂ + 50% графіт + 10% парафін	0,13	1,77	2,30
9	30% мідь + 30% MoS ₂ + 30% графіт + 10% парафін	0,12	1,75	2,21

Аналіз результатів дослідження (рис. 4) показав, що, згідно з технічним рішенням, що заявляється, при застосуванні плакувальних мастильних матеріалів у вигляді парафіну з добавками з міді, дисульфиду молібдену і графіту, у порівнянні з прототипом, знос зменшується, приблизно, на 50 %.

Найбільш раціональний процентний вміст металоплакувальної добавки як з міді, так і з дисульфиду молібдену та графіту становить 5-25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення процентного вмісту кожної з добавок не впливає на якість мастила.

Реалізація запропонованої технології можлива з механізованим нанесенням досліджуваних металоплакувальних мастильних матеріалів на гнучкі елементи пружних муфт. Для цього застосовується спеціалізована установка для металоплакування (рис. 5), що включає підйомне кільце 1, ємність з парафіном 2, оправку з пакетом заготовок 3, мішалку 4, теплоносій (воду) 5, ТЕН 6, електродвигун 7, підставку 8.

При механізованому способі заготовки гнучких елементів пружних муфт занурювали в розплав мастильного матеріалу, що знаходився у ємності установки для металоплакування. Установка працює у такий спосіб. У ємності 2 за рахунок нагрівання води ТЕНами 6 розігрівається парафін до температури 80-900С. Після цього включають електродвигун 7 мішалки 4, а до парафіну додають розрахункову кількість порошку міді, порошку дисульфиду молібдену і порошку графіту. На наступному етапі формують пакет шляхом нанизування заготовок гнучких елементів по одній на оправку. Сформований занурений пакет заготовок стискають на оправці, у результаті чого видаляється надлишок матеріалу мастила з простору між заготовками. Далі оправку піднімають над ємністю для охолодження до кімнатної температури. При цьому залишки мастила стікають у ємність.

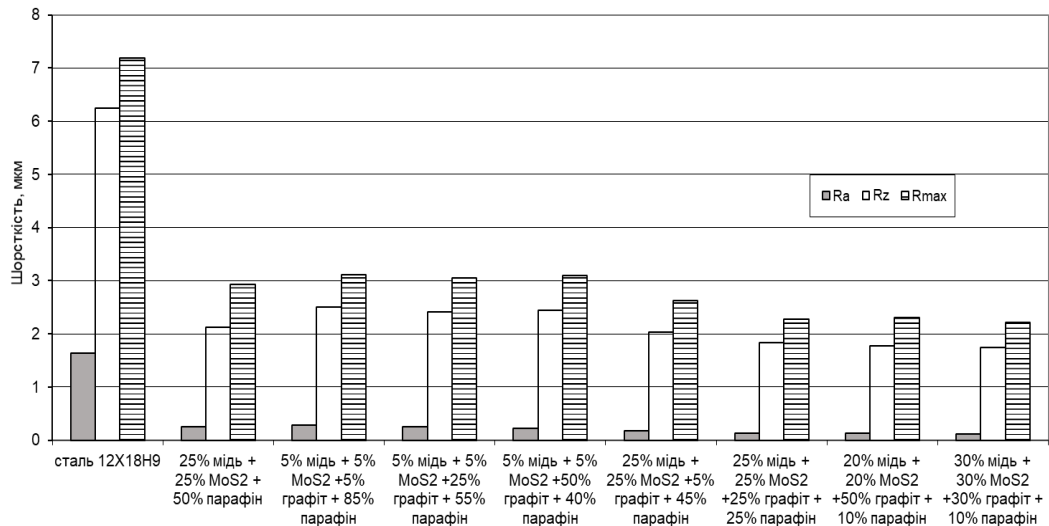


Рис. 4. Діаграма шорсткості поверхонь випробовуваних зразків

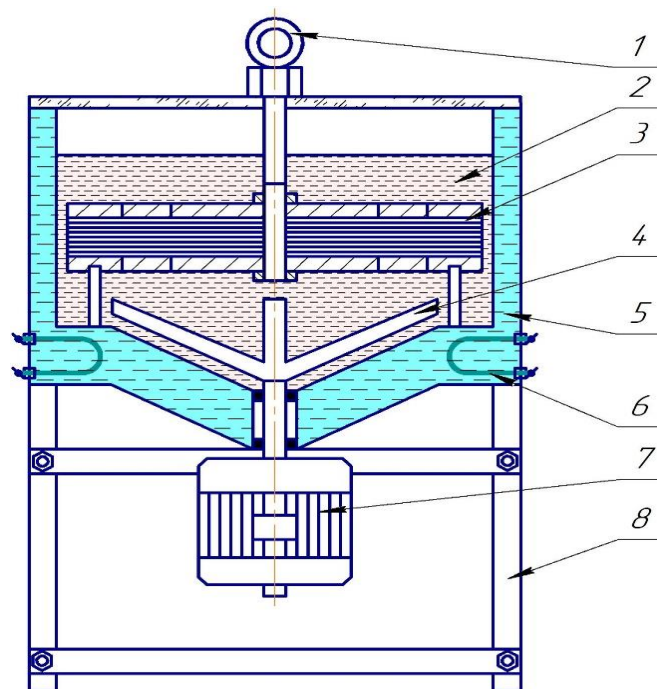


Рис. 5. Спеціалізована установка для металоплакування гнучких елементів пружних муфт

Висновок

В представленій роботі запропоновано спосіб формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, нанесення на їх сполучні поверхні попередньо приготованого металоплакувального мастильного матеріалу, до складу якого входить парафін з додаванням порошку міді і порошку дисульфиду молибдену у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожного і подальше їх складання у пакет з механічним кріпленням.

Список використаних джерел:

1. John Crane. Power Transmission Couplings. TLK Membrane Coupling for High Power Applications in the Process Industry. www.johncrane.co.uk. John Crane. Power Transmission Couplings. M Series Membrane Coupling for the Oil & Gas. www.johncrane.co.uk.

2. Гульй А.Н. О возможности применения соединительных муфт ГОСТ 26455-97 в насосных агрегатах для взрывоопасных зон. Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции ГЕРВИКОН 2005, Сумы, Украина
3. UA № 92832 C2, F16D 3/50, C10M 103/00, надрук. 10.12.2010
4. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания: Пер. с нем. - М.: Машиностроение, 1984. - С. 199-204.
5. В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак, С.А. Горовой, Технология повышения долговечности гибких элементов упругих муфт // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2008. - № 2(12). - С. 77-80
6. Патент України на корисну модель № 137273 «Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт» МПК: F16D3/70; C10M 103/100. Дата публікації: 10.10.2019.
7. В.В. Иванов, Ю.В. Марченко. Перспективы применения дисульфида молибдена для формирования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий. Вестник ДГТУ, 2010. - Т. 10. № 3(46). - С. 381-385
8. Папок К.К. Моторные и реактивные масла и жидкости, (nglib.ru)
9. Думанчук М.Ю. Підвищення ефективності виготовлення деталей пружних муфт: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Думанчук Михайло Юрійович. - Харків, 2021. - 263 с.
10. И. В. Крагельский, Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М. Н. Добычин, В.С. Комбалов – М: Машиностроение, 1977. -526 с.
11. V Melnyk et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1741 012030, DOI: 10.1088/1742-6596/1741/1/012030
12. Суслов, А. Г. Разработка новых конкурентоспособных технологий [Текст] / А. Г Суслов // Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений: Материалы Международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов им. П. А. Соловьева и В. Н. Кондратьева. - Ч. 1. - Рыбинск: РГАТА, 2006. – С. 169-175.
13. Смазка графитовая https://smazki.guru/14_smazka_grafitovaya.html
14. Зачем нужна графитная смазка? <https://vils.ru/articles/zachem-nuzhna-grafitnaya-smazka/>
15. Графитовая смазка — для чего используется <https://7road.ru/drugoe/grafitnaya-smazka-eto.html>

Рецензент: д.т.н., завідувач кафедрою тракторів та сільськогосподарських машин Сумського національного аграрного університету Зубко В.М.