

УДК 631.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.63-76>**Е.Б. Алієв**, проф., д-р техн. наук, ст. дослідник, **О.А. Черній**, ст. викл.,**Є.В. Калганков**, ст. викл.*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua*

Експериментальна перевірка якості еластомерних ущільнень типу O-ringсучасних автотракторних двигунів внутрішнього згорання

Досліджувались еластомерні кільця типу O-ring. При їх стисканні в лабораторній установці до 35% деформації, сила стиску зразків кільця аналога показала більш стрімке зменшення протягом 24 годин, ніж така залежність визначена для оригінальних кілець. При витримці досліджуваних кілець в моторній оливі 168 год, релаксація напруження в матеріалі кільця аналога більш нестабільна. При вимірюванні геометричних параметрів кілець, краща відповідність до стандартних розмірів відмічена в оригінальних кільцях.

двигун внутрішнього згорання, ущільнювальні кільця, фторкаучук, якість виготовлення еластомерних кілець, релаксація напруження, залишкова деформація

Постановка проблеми. Дослідивши та проаналізувавши тенденції зміни структури машинно-тракторних господарств сільськогосподарських підприємств в Україні, було відмічено, що наразі все більше господарі купують техніку закордонного виробництва, як нову так і бувшу у використанні. Такі зразки техніки часто потребують особливого підходу до проведення їх технічного сервісу. Перед власниками все частіше стоїть питання, чи купувати запчастини оригінального виробництва, чи придбати такі ж деталі, що виготовленні іншими виробниками. Особливо слід відмітити, що економічні затрати характеризуються дуже великою різницею. Тому результати досліджень по якості запчастин мають дати власникам господарств підґрунтя для прийняття ним рішень, що сприяли б в результаті підвищенню надійності відремонтованої техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення герметичності з'єднань в машинобудуванні все частіше досягається за рахунок постановки між деталями прокладок, виконаних з еластомерних матеріалів. А так як еластомери схильні до зміни своїх реологічних параметрів в часі, все більш актуальним є дослідження поведінки ущільнень в конкретних конструкціях машин, для підвищення їх показників надійності.

Явище релаксації напруження в еластомерному ущільнювальному кільці виконаного з гідрогенізованого нітрил бутадієнового каучуку, досліджувалось в праці [1]. Автори представили результати експериментальних досліджень поведінки матеріалу кільця, встановивши в нього тензодатчик. Також проведено моделювання в сервісі COMSOL Multiphysics version 5.2a поведінки контактної тиску в дослідному зразку кільця залежно від часу. Моделювання показало вигляд епюр напруження в матеріалі кільця при його стисканні та після витримки в стисненому стані протягом 168 годин. Отримані експериментальні та модельовані залежності зміни значення контактної тиску (бар) від часу витримки стиснутого кільця (год). При витримці 72 год, контактний тиск в кільці зменшується на 15% від початкового. Автори відмічають, що для підвищення узгодженості дослідних та експериментальних даних, потрібно удосконалювати методику моделювання.

Дослідження релаксації напруження в еластомері з торговою назвою «Vamac» представлені в роботі [2]. Досліджувались кільця прямокутного перерізу та шайби вирізані з даного еластомеру, які характеризувались різним масштабним фактором. Для кілець масштабний фактор становив $SF=0,5; 0,69; 1,25$. Для шайб – $SF=0,5; 0,74; 1,47$. Стискання зразків проводилось до значень відносної деформації 15%, 25%, 35%. При моделюванні релаксації напруження в матеріалі зразків використано програмне забезпечення NL FEA (MSC.Marc). Зміна значення сили стискання зразків при 24-годинному випробуванні описується законом $Y = 1796.9 (x)^{-0.0334}$. Встановлено, що при збільшенні величини масштабного фактора, при всіх значеннях відносної деформації зразків, сила притискання зразків зростає. Також встановлено, що найбільшу силу притискання при витримці 1 рік зберігають зразки типу шайба при відносній деформації 25%. Використовуючи дані досліджень, можна розрахувати довговічність еластомерних деталей та спрогнозувати їх надійність.

В роботі [3] представлено результати випробування зразків з еластомеру фторкаучук (FKM), з торговою назвою «Viton». Проводились такі механічні випробування при температурах $-8^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}, 23^{\circ}\text{C}, 80^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C}$: циклічні навантажувальні випробування; релаксаційні тести; багатоступеневі тести на релаксацію. При циклічному розтягу та стиску зразків відмічена деяка асиметрія петлі гістерезису: при стискуванні напруження в зразку мало більші числові значення ніж при його розтягу. В дослідження на релаксацію напруження при стисканні зразків з відносною деформацією 30% відмічено, що зі збільшенням температури зразків зменшується величина падіння напруження до рівноважного значення (при 100°C напруження знизилось за 900 с на 5%, а при -8°C – на 60%). Багатоступеневі тести на релаксацію показали, що при стискуванні зразків рівноважне значення напруження в матеріалі менше залежить від температури зразків, ніж при розтягу. Числове значення рівноважного напруження при розтягу збільшується зі збільшенням температури зразків. Модель поведінки матеріалу було реалізовано в програмі кінцевих елементів під назвою Herezh++. Використовуючи дослідні дані, розраховані параметри моделі Максвела: в'язкість, час релаксації та модуль пружності для матеріалу «Viton», який випробували при різних температурах.

Випробування фланцевих ущільнюючих прокладок, виготовлених з еластомерів Nitrile, Nitrilecork, Viton®, Viton® A401C, Viton® GFLT600, NanoViton® A401C, та Kalrez®, представлено в роботі [4]. Експерименти на прискорене старіння в умовах циклічних навантажень при стискуванні (кількість циклів зміни навантажень $2 \cdot 10^5$) та температури 100°C , показали, що ущільнюючі кільця з прямокутним поперечним перерізом мають менше числове значення показника залишкової деформації, ніж кільця з круглим перерізом. Затиснувши зразки кілець з дослідних еластомерів з відносною деформацією 20% та витримавши їх в мінеральному мастилі та повітрі при температурі 100°C протягом 144 год, отримано в результаті найменшу величину відносної деформації зразків (в повітрі – 5,04 %, в мастилі – 7,6 %) виготовлених з еластомеру марки Viton® A401C. В тестах на релаксацію напруження при відносній деформації зразків 25%, витримці 144 год при температурі 100°C в повітрі, найменше зниження напруження (близько 76% від початкового) показали зразки з еластомеру марки Viton®. При цьому в зразків з нітрильного каучуку, при вказаних умовах падіння напруження складало до 43% від початкового його значення. Результати дослідження вказують, що для виготовлення ущільнюючих кілець, що працюють в мастилі з високою температурою, найбільше підходить фторкаучук з торговою назвою «Viton».

Використовуючи програмне забезпечення ANSYS Workbench 16.2, автори в роботі [5] змоделивали поведінку ущільнюючого кільця типу O-ring виготовленого з

бутадієнакрилонітрильного каучука (NBR) з поперечним перерізом 3,53 мм, встановленого в канавку деталі. Модель показала, що найбільше зміщення кільця становить 0,44 мм близько до зазору в спряжених деталях при витримці кільця в часі 5402 с під тиском 50 бар, а максимальний тиск кільця на поверхню деталі становив 6,54 МПа. Найбільше значення напружень виникає по краям кільця в місцях, де під тиском матеріал кільця заповнює зазор між деталями. Отже, основним фактором швидкого руйнування кілець типу O-ring, автори називають наявність та величину зазору між поверхнями ущільнюючих деталей, шорсткість поверхні деталей та наявність змазки на поверхні кільця.

В роботі [6] пропонується метод моделювання деталей, виконаних з еластомерних матеріалів. Автори довели, що потрібно вводити в конститутивні моделі розрахунку еластомерів параметри об'ємного стиску, такі як об'ємний модуль стиску. Удосконалення моделі Муні-Рівлена при визначенні напружено-деформованого стану еластомерних кілець типу O-ring, збільшує точність аналітичних розрахунків міцності та довговічності кілець.

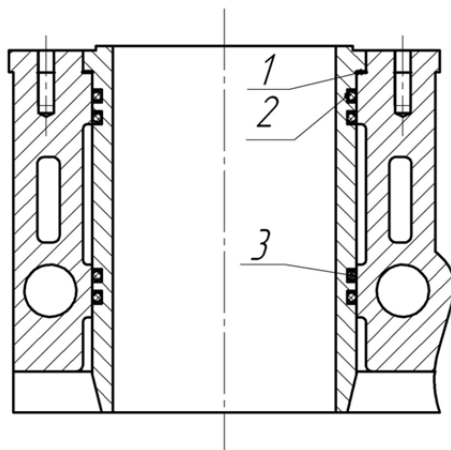
В монографії професора Дирди В.І. представлено наукові здобутки по проектуванню деталей, виготовлених з гуми. А результати дослідження їх зміни фізико-механічних властивостей у часі та при дії агресивних середовищ, є основою при виготовленні деталей з еластомерів і в теперішній час.

В роботі [7] висвітлено результати випробувань на величину релаксації напруження та залишкової деформації матеріалів сучасної рецептури виготовлення, призначених для захисту робочих поверхонь складових частин машин від шкідливого впливу абразивних частинок, з якими вони перебувають в контакті. Досліджувались термопластичний поліуретан та футерувальна гума. Відносна деформація зразків становила 40 %. Поліуретан марки «Desmopan» мав менші показники зміни напруження в матеріалі в порівнянні з зразками, що були виготовлені з гуми. Але при цьому значення модуля пружності поліуретану є більшими ніж в гумових зразках. Дослідники відмітили, що негативною характеристикою поліуретану є його, порівняно з гумою, більші показники залишкової деформації. Також порівнювались характеристики зразків, що виготовлені з нової гуми та гуми, що має напрацювання 9300 годин. В результаті відмічено, що зі збільшенням напрацювання гуми, відбуваються перетворення в її внутрішній структурі, що є причиною зміни її реологічних характеристик.

Дослідження експлуатаційної надійності гумових ущільнень передніх ведучих мостів сільськогосподарських тракторів JohnDeere висвітлено в роботі [8]. Результати показали, довірчий інтервал напрацювання сальників, при якому відбувається їх вихід з ладу становить 381,75 мото-год. – 547,2 мото-год. Довірча ймовірність становила 80 %. Таким чином, заміна цих ущільнень при проведенні регламентних технічних робіт до настання визначеного інтервалу, надасть змогу контролювати надійність трактора.

Зміну реологічних параметрів в часі гуми 2959 віброізоляторів вібраційних живильників, досліджено в роботі [9]. Експеримент показав, що за 24000 год роботи вібраційного живильника, завдяки старінню гуми 2959 віброізоляторів, амплітуда коливань робочого органу віброживильника зменшилась з 5,2 мм до 3,7 мм. Це призвело до суттєвого зменшення продуктивності конвеєра.

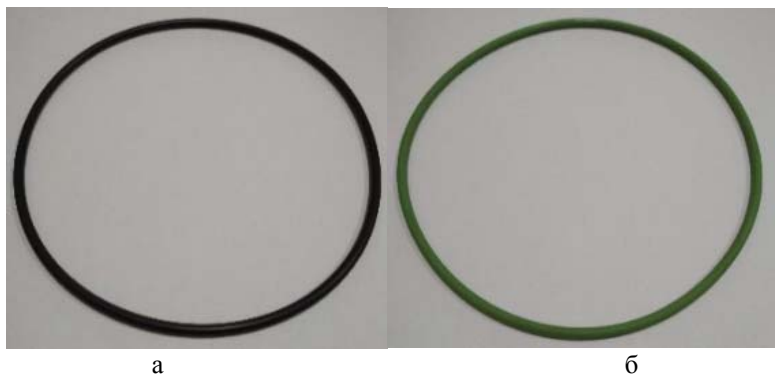
Постановка завдання. У дослідженні прийняті кільця еластомерні стандартного розміру 144×152×4. Такі деталі призначаються для герметизації посадки гільзи мокрої в посадкових місцях в блоці-картері двигуна внутрішнього згоряння. Зважаючи на інтенсивний їх нагрів та взаємодію з агресивним середовищем (моторна олива, охолоджуюча рідина) їх якість повинна бути на високому рівні.



1 – металеве кільце-підкладка; 2 – ущільнювальні еластомерні кільця типу O-ring верхнього поясу гільзи; 3 – ущільнювальні еластомерні кільця типу O-ring нижнього поясу гільзи

Рисунок 1 – Схема ущільнення мокрої гільзи двигуна внутрішнього згоряння

Джерело: розроблено на підставі [12]



а

б

а – оригінальне; б – аналог

Рисунок 2 – Досліджувані ущільнювальні кільця типу O-ring

Джерело: розроблено авторами

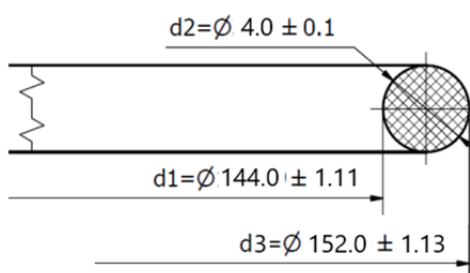


Рисунок 3 – Розміри досліджуваних ущільнювальних кілець типу O-ring згідно з ISO 3601-1

Джерело: розроблено авторами

Ще однією причиною, що вказує на велику увагу до цих деталей, є те, що при несправності еластомерних кілець, двигун повинен бути зупинений та поставлений на не плановий ремонт. А так як роботи по заміні кілець потребують розбирання двигуна, включаючи зняття головки блока циліндрів та демонтаж гільз, то часто поточний ремонт двигуна переходить в капітальний. Змінюючи при цьому і економічні витрати і час простою техніки. Для сучасних зразків сільськогосподарської техніки такі простой

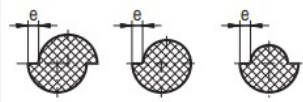
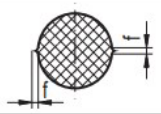
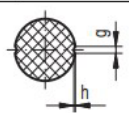

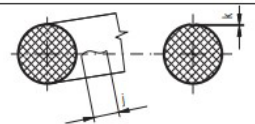
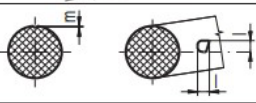
просто недопустимі. Партію кілець, що випробовувались, взято у офіційного постачальника запасних частин, і також придбано партію у неофіційних постачальників запасних частин. Кільця аналоги інших виробників не розглядались, так як доля їх використання при технічному сервісі є невеликою. Важливим є те, що ціни на такі запчастини дуже суттєво різняться. Отже, виникає питання щодо різниці якості цих кілець.

Відповідно до каталогів виробників еластомерних ущільнень, на сьогодні в якості сировини для виготовлення ущільнень для двигунів внутрішнього згоряння, використовується синтетичний фторкаучук FPM 75 (скорочена назва FKM). Цей матеріал має запатентовані торгові назви (Наприклад Viton). Стійкість до мінеральних та синтетичних моторних олів, синтетичних охолоджувальних рідин та високих експлуатаційних температур є основною характеристикою цього конструкційного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. В плані досліджень зовнішній огляд та зняття фактичних розмірів дослідних кілець стояло на першому місці. Тому зразки кілець оглянуті на мікроскопі, а також сучасними електронними вимірювальними приладами проведено їх визначення основних розмірів.

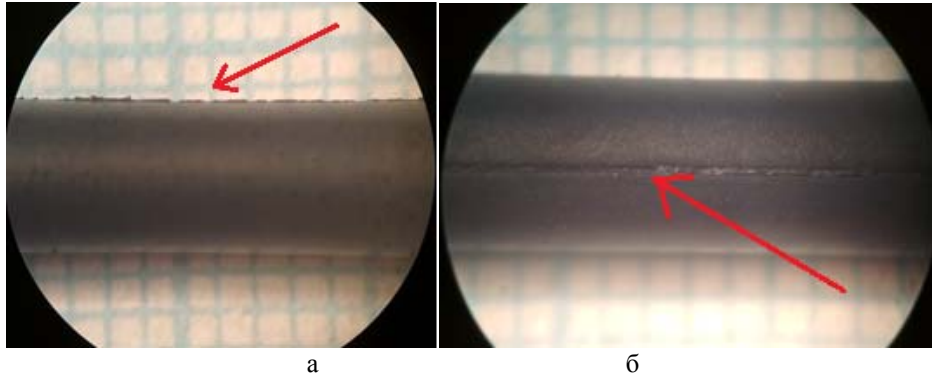
За основу при перевірці кілець використано вимоги чинних стандартів якості: ISO 3601-3. Fluidpower systems — O-rings — Part 3: Quality acceptance criteria та ISO 3601-1. Fluidpower systems — O-rings — Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes. В таблиці 1 наведено основні види відхилень, що контролюються при оцінці якості при виготовленні кілець з еластомерів.

Таблиця 1 – Види відхилень при виготовленні еластомерних кілець типу O-ring за ISO 3601-3

Вид відхилення	Схематичне зображення	Позначення	Максимальне значення, мм				
			для d_s				
			1,8	2,65	3,55	5,3	7
Зміщення		e	0,08	0,1	0,13	0,15	0,15
Випресовка кромки		f	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
Втягнута кромка		g	0,18	0,27	0,36	0,53	0,7
		h	0,08	0,08	0,1	0,1	0,13
Відхилення від круглості		-	Відхилення від круглого перерізу допустимі, якщо неправильна форма плавно переходить в кругову частину та діаметр кільця знаходиться в допустимих межах				
Підвищення та заглиблення на поверхні		j	0,05 x d_i				
		k	1,5	1,5	6,5	6,5	6,5
Недопресовка, локальні заглиблення		l	0,6	0,8	1	1,3	1,7
		m	0,08	0,08	0,1	0,1	0,13

Джерело: розроблено на підставі ISO 3601-3

Відповідно до вказаних стандартів, у дослідних зразках кілець виявлено такі дефекти: В деталях взятих у офіційного постачальника: проявляється дефект «випресовка кромки» (фото показане на рис. 3, а) (допустиме значення по ISO становить 0,14 мм), дефект «втягнута кромка» (фото показане на рис. 3, б) (допустиме значення по ISO становить 0,36 мм).

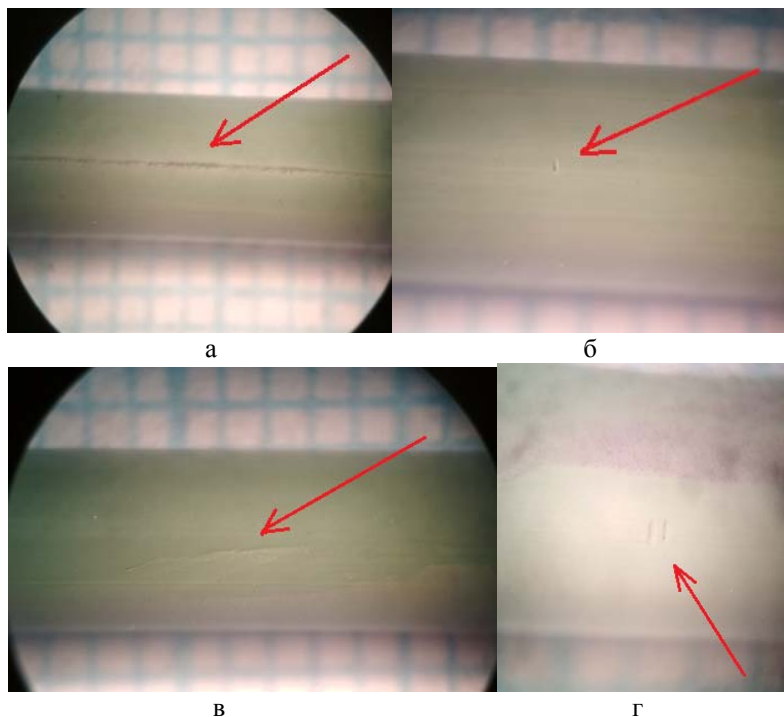


а – прояв дефекту «випресовка матеріалу», б – прояв дефекту «втягнута кромка»
(на фоні зображень підкладено міліметровий папір)

Рисунок 3 – Відхилення при виготовленні оригінального кільця:

Джерело: розроблено авторами

Оглянувши зразки не оригінального виробництва, відмічено такі дефекти: дефект «втягнута кромка» (фото показане на рис. 4, а), дефект «недопресовка» (допустиме значення по ISO становить 1,0 мм) (рис. 4, б), дефект «підвищення та заглиблення поверхні» (фото показане на рис. 4, в) (допустиме значення по ISO становить 6,5 мм), локальні заглиблення назовнішній поверхні деталі (рис. 4, г).



а– дефект «втягнута кромка», б– дефект «недопресовка», в– дефект «підвищення та заглиблення поверхні», г– виявлені риси на поверхні деталі

Рисунок 4 – Відхилення виготовлення кільця аналога

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження по виявленню видимих дефектів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати дослідження кілець на видимі зовнішні дефекти

Дослідні деталі	Результати вимірювання					
	Фактичний діаметр кільця в поперечному перерізі, мм	Номинальний діаметр кільця в поперечному перерізі згідно з ISO 3601-1, мм	Фактичний внутрішній діаметр кільця, мм	Номинальний внутрішній діаметр кільця згідно з ISO 3601-1, мм	Фактичний зовнішній діаметр кільця, мм	Номинальний зовнішній діаметр кільця згідно з ISO 3601-1, мм
1. Оригінальне кільце	4,00±0,09	4,0±0,1	144,51±0,98	144,0±1,11	152,02±1,12	152,0±1,13
2. Кільце аналог	3,94±0,07		143,02±0,85		151,01±0,86	

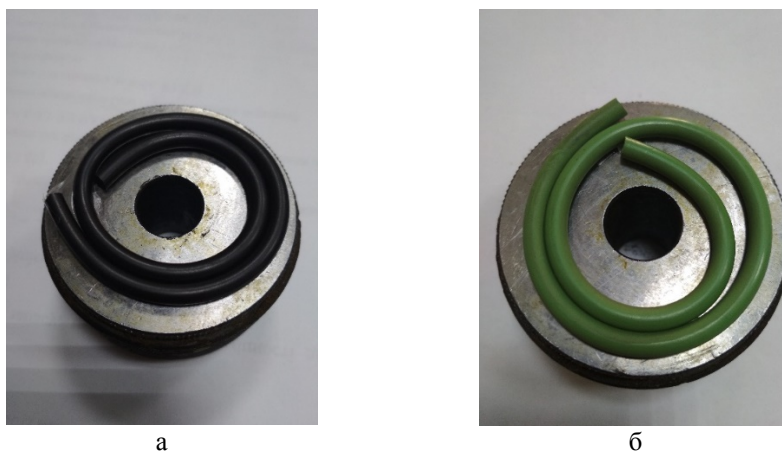
Джерело: розроблено авторами

Важливою реологічною характеристикою еластомерного матеріалу є релаксація напруження при сталій відносній деформації. Випробування дослідних зразків виготовлених з гуми та поліуретану на релаксацію регламентується стандартами ASTM D6147, ISO 3384. Прояв зменшення напруження в матеріалі при його деформації є результат складної молекулярної будови еластомерів. Якщо ущільнення будуть виготовлені з матеріалу, що має значні прояви релаксаційних процесів, це призведе до розгерметизації спряження деталей, а отже, і до відказу двигуна в цілому. Тому при оцінці якості кілець для ущільнення, важливо перевіряти їх на схильність до релаксації при сталій деформації.

Теоретичною базою в експериментах на релаксацію були стандарти: ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature» [10], ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) «Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації після стискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури» [11].

Були підготовлені дослідні зразки кілець. Для дослідження виготовлені зразки з нових кілець та з кілець, які витримані в моторній оливі при кімнатній температурі протягом 168 годин. Схема встановлення дослідних зразків показана на рис. 5. В дослідженнях було задіяно лабораторне обладнання: ручний прес ДМ-30М поз.1 (рис. 6), кільцевий динамометр з номінальною силою стиску 20кН, пристосування ДМ-22М поз.2. По мостовій схемі на поверхню стержня центрального болта пристосування ДМ-22М змонтовано чотири тензодатчика. Обладнання, що входить в вимірювальну апаратуру (позиції 3 та 4 на рис. 6), приймало та оброблювало сигнали від тензодатчиків. Паспортна точність фіксації сили стискання регламентовано в 1 Н. Індикатори годинникового типу використовувались для оцінки деформації стиску зразків. Відхилення від шорсткості поверхонь притискних пластин відповідало параметру Ra 0,4. Дослідні зразки кілець були стиснуті болтовим з'єднанням пристрою 2 до встановлення значення відносної деформації в межах 35 %. Фіксація показників релаксації напруження в матеріалах кілець проводилась способом зняття показань з тензодатчиків через встановлені відрізки часу. Часові межі були такими: перша точка дорівнювала 30с після початку стиску; рівномірними послідовними часовими точками були 10, 15, 60, 100, 150 хв. Загальний час стискання зразків кілець становив 24 ±0,5 години. Контрольна температура при якій проводилось випробування дорівнювала 22 ±1 °С. Залишкову відносну деформацію зразків визначали шляхом їх обміру після 30±3 хвилин перебування їх без навантаження після перевірки на

релаксацію. Також проводились заміри залишкового значення діаметра кільця в напрямку його стискання електронним штангенциркулем з точністю 0,01 мм з тиском губок на вимірювану поверхню не більше 0,01 МПа.



а – кільце оригінал; б – кільце аналог

Рисунок 5 – Зразки дослідних кілець, підготовлені до стискання

Джерело: розроблено авторами



1 – ручний гвинтовий прес ДМ-30М; 2 – пристосування ДМ-22М; 3 – мультиметр; 4 – комп'ютер

Рисунок 6 – Загальний вигляд дослідної установки

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження матеріалу кілець представлено в таблиці 3. Визначено значення таких параметрів як: твердість матеріалу кілець по Шору, од; вагу кілець, г; швидкість релаксації напруження, К; залишкову деформацію після стискання, δ , %; рівноважний модуль, $E_{\text{рівн}}$, МПа; величину падіння напруження до рівноважного значення, Δ , %.

Таблиця 3 – Результати випробування ущільнювальних кілець

Дослідні кільця	Показники випробування					
	Твердість, од.	Фактична вага, г	Швидкість релаксації напруження, К	Значення величини падіння напруження, Δ , %	Модуль пружності рівноважного стану, $E_{\text{рівн}}$ МПа	Значення залишкової деформації, δ , %
1. Кільце-оригінал	75–77	10,170 ±0,093	0,060 ±0,012	18,0 ±0,2	11,20 ±0,12	1,4 ±0,1
2. Кільце аналог	73–75	12,400 ±0,082	0,110 ±0,009	31,0 ±0,3	8,60 ±0,13	4,3 ±0,2
3. Оригінальне кільце (витримка в моторній оливі 168 год)	75–77	–	0,061 ±0,011	19,3 ±0,2	11,26 ±0,14	2,9 ±0,1
4. Кільце аналог (витримка в моторній оливі 168 год)	74–77	–	0,200 ±0,012	33,5 ±0,3	6,63 ±0,09	3,6 ±0,1

Джерело: розроблено авторами

Провівши комплекс експериментів, отримані експериментальні графіки залежностей зміни сил стиску зразків від часу їхньої витримки при сталій відносній деформації 35%. Їхні видипредставлено на рис. 7.

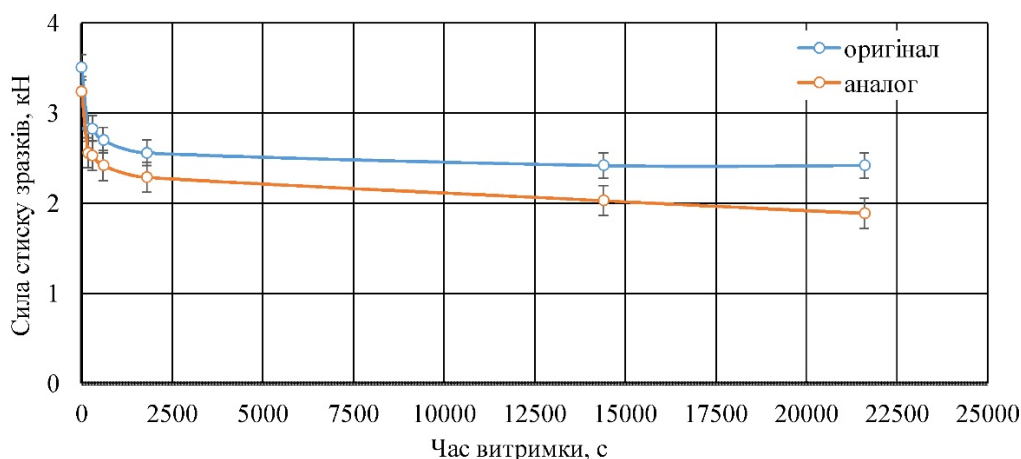


Рисунок 7 – Отримані дослідні залежності зміни сили стискування зразків кілець залежно від часу (відносна деформація зразків становила 35%)

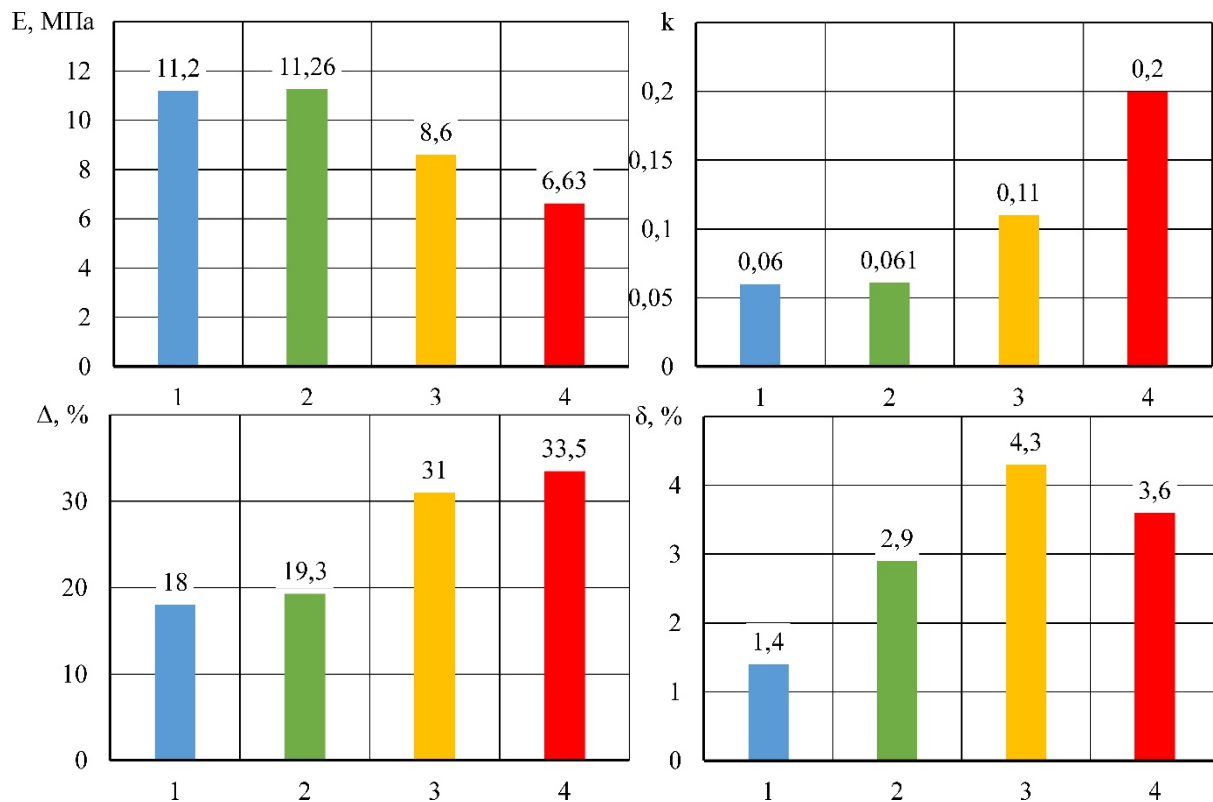
Джерело: розроблено авторами

При моделюванні поведінки деталей, виготовлених з еластомерів при їх деформації, найчастіше використовують модель Максвела та модель Фохта-Кельвіна.

Паралельне з'єднання пружного та в'язкого елементів описується моделлю Фохта-Кельвіна, а функціональний зв'язок між напруженням та деформацією має вигляд $\sigma = E(\varepsilon + \tau\dot{\varepsilon})$, в якій ε – значення відносної деформації, $\dot{\varepsilon}$ – значення швидкості деформації, $\tau = \frac{3\eta}{E}$ – дослідний час затримки деформації, η – дослідний коефіцієнт в'язкості. Пружинним середовищем в стані спокою буде, коли $\varepsilon = 0$. З постійною деформацією ($\varepsilon = \text{const}$) напруження в ньому будуть залишатися незмінними ($\sigma = E\varepsilon$). Залежність деформації від часу при сталому напруженні ($\sigma = \text{const}$), описується законом

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

де σ_0 – початкове напруження.



1 – оригінальне кільце; 2 – оригінальне кільце (витримка в моторній оливі 168 год); 3 – кільце аналог; 4 – кільце аналог (витримка в моторній оливі 168 год); k – параметр швидкості релаксації напруження;

Δ – параметр величини падіння напруження до рівноважного значення, %; $E_{\text{рівн}}$ – модуль пружності при рівноважному стані, МПа; δ – параметр залишкової деформації після стискування, %

Рисунок 8 – Дослідні діаграми показників випробування зразків ущільнювальних кілець

Джерело: розроблено авторами

Для моделі в'язко-пружного матеріалу Максвелла, при сталому діючому напруженні ($\sigma = \text{const} = \sigma_0$), в початковий період часу $t = 0$, система отримує миттєву пружну деформацію σ_0/E , й в подальшому деформація буде протікати з постійною швидкістю. При незмінній деформації в часі (наприклад, гумовий зразок стиснутий або розтягнений, й кінці його зафіксовані), при $t = 0$ та $\varepsilon = \text{const}$, напруження зменшується по залежності

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^n E_i \varepsilon_0 e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (2)$$

де n – кількість механічних елементів;

τ_i – час релаксації i -го реологічного елементу, що описує час необхідний для зменшення напруження до величини $1/e$ від його початкового значення;

E_0 – рівноважний модуль пружності після релаксації;

E_i – модуль пружності i -го реологічного елементу;

ε_0 – величина відносної деформації;

t – час (змінна величина).

Для зручності перетворимо залежність напруження в матеріалі від часу на залежність сили нормальної стиску на зразок від часу, припускаючи, що площа дії сили в часі не змінюється.

$$F(t) = F_0 + \sum_{i=1}^n F_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (3)$$

Ця математична модель описує процес релаксації напруження ряду матеріалів, деформація яких постійна в часі за швидкістю.

Так, провівши обробку експериментальних даних, було визначено теоретичні функціональні залежності зміни нормальної сили тиску еластомерних кілець на поверхні деталей спряження залежно від часу. При дослідженні на релаксацію напруження в оригінальному кільці, значення часу релаксації становить $\tau_1=60$ с, $\tau_2=3000$ с. Апроксимована функція має вигляд:

$$F(t) = 2,29 + 1,22e^{\frac{-t}{60}} + 0,45e^{\frac{-t}{3000}}, \text{кН} \quad (4)$$

Графіки експериментальних та теоретичних залежностей зміни сили притискання від часу оригінального кільця представлено на рис. 9.

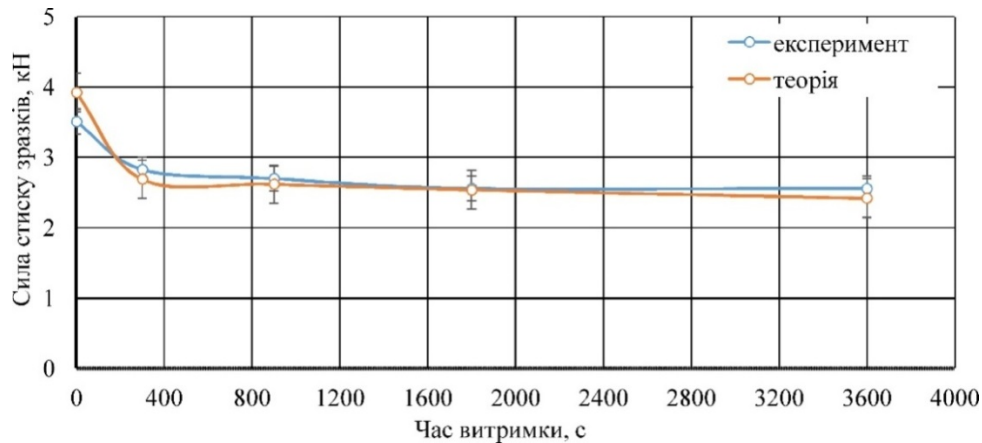


Рисунок 9—Експериментальна та теоретична криві зміни сили стискування оригінальних кілець залежно від часу витримки (до 3500 с) (відносна деформація зразків кільця оригіналу 35%)
Джерело: розроблено авторами

При дослідженні на релаксацію напруження в кільці аналога значення часу релаксації становить $\tau_1=80$ с, $\tau_2=2700$ с. Апроксимована функція має вигляд:

$$F(t) = 1,76 + 1,48e^{\frac{-t}{80}} + 0,7e^{\frac{-t}{2700}}, \text{кН} \quad (5)$$

Графіки експериментальних та теоретичних залежностей зміни сили притискання від часу кільця аналога представлено на рис. 10.

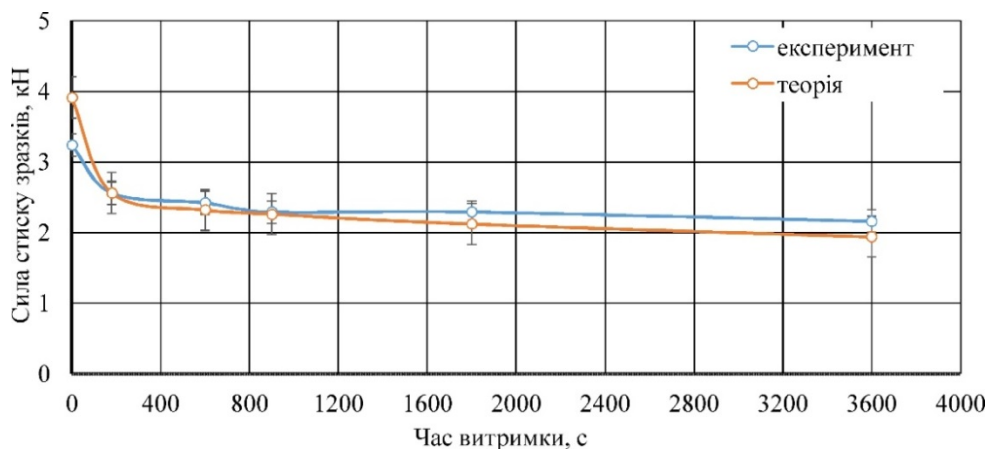


Рисунок 11 – Експериментальна та теоретична криві зміни сили стискування кільця аналога залежно від часу витримки (до 3500 с) (відносна деформація зразків кільця аналога 35%)
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Проведено дослідження параметрів якості виготовлення і ефекту релаксації напруження та значення залишкової деформації кілець типу O-ring, що використовуються для герметизації спряження мокрої гільзи та посадкового поясу блока циліндрів в сучасних двигунах внутрішнього згоряння. Випробувано кільця оригінального виробництва та замітника (аналога). Випробування показали, що хоча кільця обох виробників мають видимі дефекти на їхніх поверхнях, утворені при виробництві, проте, кільця аналога мають більшу кількість дефектів різних видів ніж кільця оригіналу. При вимірюванні геометричних параметрів кілець, краща відповідність до стандартних розмірів відмічена в оригінальних кільцях. Зафіксовано також, що, при порівняно однакових розмірах кілець, вага кільця аналога є більшою за кільце оригінала на 22%. Це може вказувати, що матеріали кілець відрізняються. При їх стисканні до відносної деформації 35% та витримці в часі, зафіксовано експериментальні дані зміни напруження в матеріалі кілець.

Крива падіння сили стиску зразків кільця аналога показує більш стрімке зменшення сили стиску при витримці протягом 24 годин ніж така залежність визначена для оригінальних кілець. Це вказує на те, що є висока ймовірність того, що встановивши при ремонті двигуна не оригінальні кільця, з часом спряження може втратити герметичність. А якщо враховувати, що посадочні місця кілець на блоках циліндрів ще пошкоджені й іншими факторами, такими як корозія, то ймовірність появи відказу спряження зростає ще більше.

Аналізуючи, розраховані за експериментальними даними параметри процесу релаксації напруження в матеріалах кілець, можна стверджувати, що матеріал оригінального кільця характеризується меншою швидкістю релаксації напруження, меншою величиною падіння напруження до рівноважного значення та меншою залишковою деформацією після стискання, ніж матеріал кільця аналога. Також відмічено, що при витримці досліджуваних кілець в моторній оливі протягом 168 год та подальшому їх стисканні, параметри релаксації напруження в матеріалі кільця аналога характеризуються більшою нестабільністю.

Використавши теоретичні залежності еластомерної моделі Максвела, та експериментальні дані, створені теоретичні залежності, що описують релаксаційні процеси в матеріалах кілець оригінального та неоригінального виробництв.

Отже, хоча великою перевагою кілець аналога є їх порівняно невелика ціна на ринку, але дослідні дані вказують на те, що оригінальні еластомерні кільця мають кращі механічні та реологічні характеристики та якість виготовлення. Стабільність механічних параметрів еластомерів в часі – запорука високої експлуатаційної надійності конструкцій, в яких вони використовуються.

Результати дослідження можуть бути використані при виборі запасних частин при технічному сервісі сучасної сільськогосподарської техніки та розрахунках на роботоздатність та надійність еластомерних деталей для ущільнення спряжень.

Список літератури

1. Gräbner D., Zahn R., Schotzko T., Giese U., Lang W. Condition Monitoring of O-Ring Seals with Integrated Strain Gauges and Finite Element Analysis Assisted Signal Evaluation. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 52. Pp. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.011>
2. Fong R. D., Sancaktar E. Compressive Stress Relaxation and Nonlinear Finite Element Analysis of Ethylene/Acrylic Vamac® Terpolymer Elastomer (AEM). *Design Engineering*. 2004. Pp. 261-269; <https://doi.org/10.1115/imece2004-60812>
3. Laurent H., Rio G., Vandenbroucke A., Ait Hocine N. Experimental and numerical study on the temperature-dependent behavior of a fluoro-elastomer. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2014. Vol. 18(4). Pp. 721–742. <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9247-3>

4. Lunardi G., Serrano M., Tamez G. Long Lasting, High Reliability Gaskets for Leakage-free Oil Immersed Transformers. Conference: TechCon 2013. www.researchgate.net/publication/290391714_Long_Lastig_High_Reliability_Gaskets_for_Leakage-free_Oil_Immersed_Transformers
5. Szabó G., Váradii K. Large Strain Viscoelastic Material Model for Deformation, Stress and Strain Analysis of O-rings. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 62(2). Pp. 148–157, <https://doi.org/10.3311/ppme.11595>
6. Cassenti, B. N., & Staroselsky, A. Deformation and stability of compressible rubber O-rings. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2017. Vol. 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0072-8>
7. Пугач А.М., Черній О.А., Калганков Є.В. Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. 8(39), ч.І. С. 76–84. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.76-84](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.76-84)
8. Черній О. А. Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (March 2-4, 2022). Perfect Publishing. Vancouver, Canada. 2022. Pp. 13-20. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and-prospects-of-world-science-2-4-marta-2022-goda-vancouver-kanada-arhiv/>.
9. Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. / Dyrda V. I., Lysytsia M. I., Lapin V. A. et al., *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020. Vol. 6. № 444 . Pp. 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132
10. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of stress relaxation in compression – Part 1: Testing at constant temperature».
11. ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації після стискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури. Чинний з 01.09.2019 Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2019. 14 с.
12. MAN TGA з 2000 по 2020: Ремонт, обслуговування, електросхеми. «Моноліт», 2020. 796 с.

References

1. Gräbner, D., Zahn, R., Schotzko, T., Giese, U., & Lang, W. (2020). Condition Monitoring of O-Ring Seals with Integrated Strain Gauges and Finite Element Analysis Assisted Signal Evaluation. *Procedia Manufacturing*, 52, 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.011>. [in English].
2. Fong, R. D., & Sancaktar, E. (2004). Compressive Stress Relaxation and Nonlinear Finite Element Analysis of Ethylene/Acrylic Vamac® Terpolymer Elastomer (AEM). *Design Engineering*. <https://doi.org/10.1115/imece2004-60812>. [in English].
3. Laurent, H., Rio, G., Vandenbroucke, A., & Aït Hocine, N. (2014). Experimental and numerical study on the temperature-dependent behavior of a fluoro-elastomer. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 18(4), 721–742. <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9247-3>. [in English].
4. Lunardi, G., Serrano, M., Tamez, G. (2013). Long Lasting, High Reliability Gaskets for Leakage-free Oil Immersed Transformers. Conference: TechCon 2013. www.researchgate.net/publication/290391714_Long_Lastig_High_Reliability_Gaskets_for_Leakage-free_Oil_Immersed_Transformers. [in English].
5. Szabó, G., & Váradii, K. (2018). Large Strain Viscoelastic Material Model for Deformation, Stress and Strain Analysis of O-rings. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. Vol. 62(2). 148–157 <https://doi.org/10.3311/ppme.11595>. [in English].
6. Cassenti, B. N., & Staroselsky, A. (2017). Deformation and stability of compressible rubber O-rings. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0072-8>. [in English].
7. Puhach, A., Chernii, O., & Kalhankov, Y. (2023). Study of the Effect of Stress Relaxation and Residual Deformation of Modern Polymer Materials to Protect the Surfaces of Parts From Wear. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1(8(39)), 76–84. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.76-84](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.76-84). [in Ukrainian].
8. Chernii O. A. . (2022). Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. *Innovations and prospects of world science*. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference (March 2-4, 2022). Perfect Publishing. Vancouver, Canada. Pp. 13–20. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and->

- prospects-of-world-science-2-4-marta-2022-goda-vankuver-kanada-arhiv/[in Ukrainian].
9. Dyrda V. I., Lysytsia M. I., Lapin V. A., Ahaltsov H. M., Kalhankov Ye. V., Tolstenko O. V., Chernii O. A. (2020). Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. Vol. 6, No. 444 (2020), 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132. [in English].
 10. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature». [in English].
 11. Guma vulkanizovana chi termoplastichna. Vznachennya zalishkovoyi deformaciyi pislya stiskannya. Chastina 1. Viprobuvannya za standartnoyi chi pidvishenoyi temperaturi , 14 DSTU 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) (2019) [in Ukrainian].
 12. MAN TGA z 2000 po 2020: Remont, obsluhovuvannya, elektroskhemy. «Monolit», 2020. 796 c. [in Russian].

Elchyn Aliiev, Prof., DSc., Senior Researcher

Olexandr Chernii, Senior Lecturer

Yevhen Kalhankov, Senior Lecturer

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Experimental Testing of the Quality of elastomeric Seals of the O-ring Type of Modernauto-Tractor Internal Combustion Engines

The purpose of the work is to study the manufacturing quality and stress relaxation during compression and determine the residual deformation of elastomeric sealing rings of the O-ring type, which are used in the technical service of modern agricultural machinery.

Experimental studies were carried out on a DM-30M laboratory unit. During the test, the dependence of the stress drop in compressed samples of materials on time, the rate of stress relaxation, the magnitude of the stress drop to the equilibrium value, the equilibrium modulus, and the residual deformation after the removal of the load were determined. An approximation of the dependences of changes in experimental data was carried out.

O-rings, used for sealing the coupling of the wet sleeve and the landing belt of the cylinder block in modern internal combustion engines, were tested. The rings of the original production and the substitute (analogue) were tested. Tests showed that although the rings of both manufacturers have visible defects on their surfaces, formed during production, however, the analog rings have a greater number of defects of various types than the rings of the original. The curve of the decrease in compressive strength of analog ring samples shows a more rapid decrease in compressive strength during exposure for 24 hours than such a dependence determined for the original rings. It was also recorded that, with relatively identical ring sizes, the weight of the analog ring is 22% greater than the original ring. This may indicate that the ring materials are different. It was noted that when the studied rings are kept in engine oil for 168 hours and their subsequent compression, the stress relaxation parameters in the analog ring material are characterized by greater instability.

This indicates that there is a high probability that by installing non-original rings during engine repair, the coupling may lose tightness over time. Especially with damaged ring seats.

internal combustion engine, sealing rings, fluororubber, manufacturing quality of elastomeric rings, stress relaxation, residual deformation

Одержано (Received) 21.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024