

Рудик О.Ю.,*
Дитинюк В.О.,*
Стебелецька Н.М.**

* Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна,

** Бережанський агротехнічний інститут,
м. Бережани, Україна

E-mail: yuhymovych@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ РОБОТИ І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВАЛУ ЗЧЕПЛЕННЯ ДВИГУНА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

УДК 621.891

DOI:10.31891/2079-1372-2018-90-4-70-79

Показано, що базовими характеристиками якості транспортно-технологічних машин та їх агрегатів є надійність і зносостійкість, які відображують службові властивості цих об'єктів. Вказані характеристики закладаються при проектуванні й виробництві машин, реалізуються в експлуатації й відновлюються за допомогою ремонту. В роботі методологія взаємозв'язку теорії та експерименту доповнюється принципами комп'ютерного моделювання. Ця процедура дала можливість комплексного вивчення поведінки складних систем як природних, так і для перевірки теоретичних гіпотез. Застосування для вивчення напружено-деформованого стану твердих тіл системи твердотілого параметричного моделювання SolidWorks дозволило побудувати точну модель деталі й методом скінченних елементів визначити експлуатаційні параметри за конкретних умов експлуатації. Дослідження валу зчеплення за допомогою SolidWorks Simulation показало, що у випадку заміни сталі 45X на сталь 20 для виготовлення запас міцності достатній за рахунок економії на вартості матеріалу. Застосуванням САПР для зміцнення валу муфти зчеплення встановлений оптимальний режим його цементації. Отримані експериментальні результати підтверджують актуальність проведеного дослідження з використанням SolidWorks Simulation. Встановлено, що у випадку заміни загартованої сталі 45X на цементовану сталь 20 для виготовлення валу муфти зчеплення підвищення зносостійкості становитиме 1,49 разів.

Ключові слова: вал муфти зчеплення автомобіля, твердотільне моделювання, запас міцності, режими відновлення, цементація, експериментальні випробування на знос.

Вступ

Однією з основних характеристик якості транспортно-технологічних машин та їх агрегатів є надійність, яка відображає службові властивості зазначених об'єктів, що закладаються при проектуванні й виробництві машин, реалізуються в експлуатації й відновляються за допомогою ремонту. Проблема підвищення надійності за рахунок зносостійкості це одна з найважливіших у машинобудуванні. Традиційна методологія взаємозв'язку теорії та експерименту доповнюється принципами комп'ютерного моделювання надійності. Ця процедура дає можливість цілісного вивчення поведінки найскладніших систем як природних, так і створюваних для перевірки теоретичних гіпотез. Застосування для вивчення напружено-деформованого стану твердих тіл 3D системи твердотілого параметричного моделювання SolidWorks дозволяє побудувати точну модель деталі й методом скінченних елементів визначити експлуатаційні параметри (додаток SolidWorks Simulation), які виникають у ній за конкретних умов експлуатації.

Мета роботи

Зчеплення у автотранспортних засобах захищає механізми трансмісії від динамічних навантажень, які у ній виникають при різкому гальмуванні, нерівномірній роботі двигуна й різкому зниженні частоти обертання колінчастого валу, при наїзді коліс автомобіля на нерівності дороги. Тому очевидна необхідність підвищення зносостійкості деталей, а зокрема, валу муфти зчеплення. Отже, метою роботи ставилось дослідження валу муфти зчеплення автомобіля (сталь 45X) з можливістю заміни даного матеріалу на дешевший - сталь 20.

Аналіз об'єкту досліджень

Зчеплення служить для тимчасового роз'єднання двигуна і трансмісії й плавного їх з'єднання. Тимчасове роз'єднання двигуна і трансмісії необхідне при перемиканні передач, гальмуванні й зупинці автомобіля, а плавне з'єднання після перемикання передач і при рушанні з місця, при цьому за допомогою зчеплення здійснюється розгін автомобіля [2].

При русі автомобіля зчеплення у включеному стані передає крутний момент від двигуна до коробки передач й захищає механізми трансмісії від динамічних навантажень, які у ній виникають. Такі навантаження в трансмісії виникають при різкому гальмуванні автомобіля, нерівномірній роботі двигуна й

різкому зниженні частоти обертання колінчастого валу, а також при наїзді коліс автомобіля на нерівності дороги і т.д.

Для надійної роботи автомобіля до зчеплення, окрім загальних вимог до конструкції автомобіля, висуваються спеціальні вимоги, відповідно до яких воно повинне забезпечувати [2]:

- надійну передачу крутного моменту від двигуна до трансмісії;
- плавність і повноту включення;
- мінімальний момент інерції ведених частин;
- оберігання механізмів трансмісії від динамічних навантажень;
- підтримка натискного зусилля в заданих межах в процесі експлуатації;
- легкість управління й мінімальні витрати фізичних зусиль на управління.

Муфта зчеплення є муфтою тертя (фрикційною муфтою), за допомогою якої можна плавно роз'єднувати і сполучати колінчастий вал з першим валом коробки передач, що необхідно при маневруванні автомобіля і при перемиканні шестерень коробки передач [3].

Надійна робота зчеплення без перегріву й значних зносів особливо важлива у важких дорожніх умовах руху автомобіля і при наявності причепа й напівпричепа, коли мають місце більш часті включення й вимкнення, а також буксування зчеплення. Зчеплення при надійній роботі повинне забезпечувати можливість передачі крутного моменту, що перевищує крутний момент двигуна. Зі зношуванням фрикційних накладок веденого диска зусилля натискних пружин слабшає і зчеплення починає буксувати. При цьому тривале буксування зчеплення приводить до його сильного нагрівання й виходу з ладу.

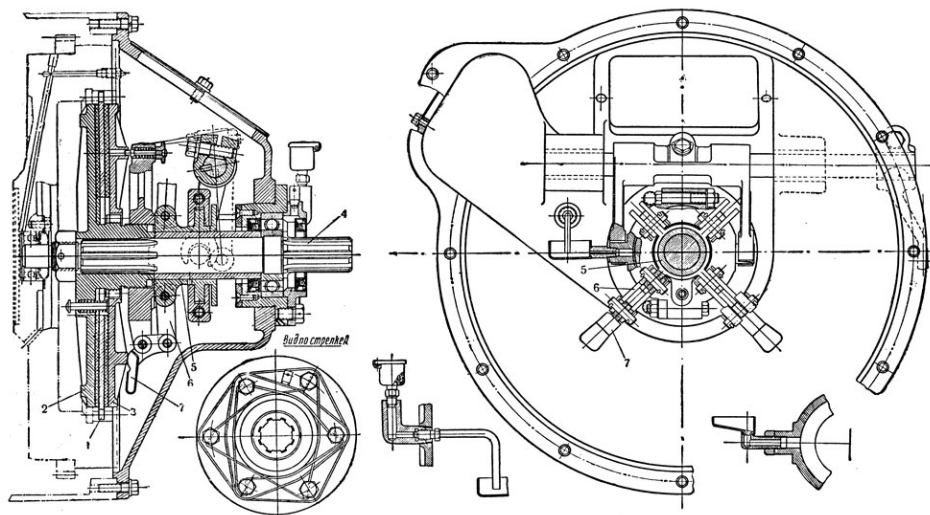


Рис. 1 – Муфта зчеплення :

- 1 – диск ведучий;
- 2, 3 – диски ведені;
- 4 – вал;
- 5 – муфта ввімкнення;
- 6 – ланки;
- 7 – кулачки

Зчеплення повинне включатися плавно, щоб не викликати підвищених навантажень у механізмах трансмісії й дуже великих прискорень, які негативно впливають на водія, пасажирів і перевезені вантажі. Так, наприклад, при різкому включенні зчеплення трансмісії, скручуючі навантаження можуть бути в 3 - 4 рази більше максимального крутного моменту двигуна. Це відбувається тому, що при швидкому відпусканні педалі керування зусилля стиску ведучих і ведених частин зчеплення в початковий момент створюється не тільки натискними пружинами, але й кінетичною енергією маховика, що переміщується в напрямку натискного диска й пов'язаних з ним деталей. При цьому в момент зіткнення ведучих і ведених частин зчеплення зусилля їх стиску в кілька разів перевищує силу натискних пружин. Чистота вимкнення зчеплення характеризує повне роз'єднання двигуна й трансмісії, при якому ведучі деталі зчеплення не ведуть за собою ведені. При неповному вимкненні зчеплення утрудняється перемикання передач (воно відбувається із шумом), що приводить до зношування шестерень і синхронізаторів. Якщо ж зчеплення вимкнене не повністю, а в коробці передач ввімкнута передача, то при працюючому двигуні зчеплення буде буксувати. Це приводить до нагрівання деталей зчеплення й зношуванню фрикційних накладок веденого диска. Типова муфта зчеплення (рис. 1) сконструйована наступним чином. Ведучий диск 1 затискається між двома веденими дисками 2 і 3, пов'язаними з валом 4. Затискання ведучого диска 1 між двома веденими 2 і 3 здійснюється за допомогою механізму, що складається з муфти включення 5, ланок 6 і

кулачків 7. При переміщенні муфти 5 вліво кулачки обернуться і затиснуть ведучий диск 1 між двома веденими. Для вимкнення необхідно муфту пересунути вправо. Тоді кулачки припинять натиснення і муфта буде вимкнена [3, 8].

Муфти зчеплення завдяки великій жорсткості натискного механізму вимагають у процесі експлуатації частого регулювання, окрім цього, вони вмикаються жорстко без необхідного пробуксування дисків [4 - 6]. Для усунення цих недоліків в автомобільних муфтах зчеплення застосовують пружний елемент невеликої жорсткості, включений послідовно в натискний механізм. Такі муфти одержали назву непостійнозамкнуті з компенсаційними пружинами. Виконуються вони з циліндровими або з пластинчастими пружинами. Непостійнозамкнуті муфти зчеплення одержали порівняно обмежене застосування: на стаціонарних, пускових двигунах.

Дослідження контактної міцності валу муфти зчеплення за допомогою SolidWorks Simulation

З бібліотеки SolidWorks [8] вибрані сталь DIN 1,7006 (46Cr2) - аналог сталі 45X, та AISI 1020 - аналог сталі 20, з границями міцності на розтяг 900,000 МПа і 420,507 МПа відповідно. Параметри сітки наведено у табл. 1, а її відображення на деталі представлено на рис. 2.

Встановлено, що максимальні вузлові напруження Von Mises, переміщення URES і деформація ESTRN для валу зі сталі 45X складають 148,822 МПа, 0,0721482 мм і 0,000334669 мм, а для сталі 20 – 148,407 МПа, 0,0757222 мм і 0,000355215 мм відповідно, тобто в обох випадках не перевищують допустимих значень. Так як максимальна деформація валу складає 0,0003 мм, то вона не може бути причиною погіршення працездатності зчеплення. Очевидно, саме знос валу створює люфт і погіршення плавності й повноти включення.

Таблиця 1

Параметри сітки

Тип сітки	Сітка на твердому тілі	Усього вузлів	21236
Розбивка	Стандартна сітка	Усього елементів	13170
Точки Якобіана	4 Точки	Максимальне співвідношення сторін	10,424
Розмір елемента	7,39261 mm	% елементів зі співвідношенням сторін < 3	92,3
Допуск	0,36963 mm	% елементів зі співвідношенням сторін > 10	0,106
Якість сітки	Висока	% перекручених елементів (Якобіан)	0

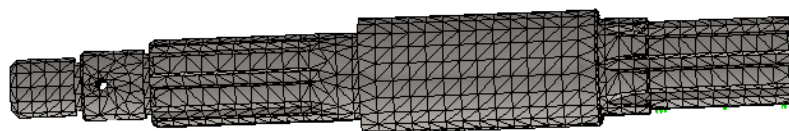


Рис. 2 – Скінечно-елементна сітка моделі валу муфти зчеплення



Рис. 2 – Розподіл запасу міцності для сталі 40X



Рис. 4 – Розподіл запасу міцності для сталі 20

В результаті встановлено, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності знаходиться у вузлі № 15195 і для валу зі сталі 45X становить 4,36763, а зі сталі 20 – 2,36896 (рис. 3 і 4 відповідно). Тобто, у випадку заміни сталі 45X на сталь 20 для виготовлення валу запас міцності достатній.

САПР для зміцнення валу муфти зчеплення

При аналізі роботи валу муфти зчеплення було встановлено, що при його експлуатації підлягають інтенсивному зношуванню наступні поверхні: шліци ($h = 6$ мм); посадкове місце муфти вмикання ($\varnothing 50$ мм). Матеріал валу – загартована сталь 45X.

Основні деталі валу муфти зчеплення та дефекти зведені у табл. 2 та 3 (застосовано MS Access).

Таблиця 2

Основні деталі муфти зчеплення

Основні деталі муфти зчеплення	
Код деталі	Назва деталі
1	Вал
2	Важіль
3	Диск натискний
4	Обойма підшипника

Таблиця 3

Дефекти валу

Дефекти валу муфти зчеплення : таблиця			
Код деталі	№ дефекту	Назва дефекту	Метод чи прилад контролю
1	1	Зношування шліців	Шаблон
1	7	Зношування d50	Мікрометр

У табл. 4 наведені допустимі способи зміцнення валу:

- заводська технологія: загартована сталь 45X;
- пропонований варіант: заміна загартованої сталі 45X на цементовану сталь 20.

Таблиця 4

Способи зміцнення валу

Способи зміцнення валу : таблиця				
№ дефекту	№ способу усунення дефекту	Спосіб зміцнення	Твердість після зміцнення, HRC	Глибина зміцненого шару, мм
1	1	Гартування	58	0,5
1	2	Цементация	62	1,5

Для вибору способу зміцнення валу проведений запит мовою SQL. Запит мовою SQL показаний на рис. 5.

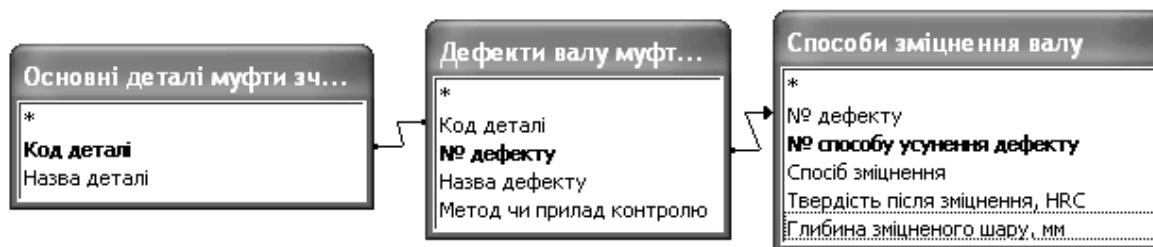


Рис. 5 – Схема БД для запиту мовою SQL

SELECT [Основні деталі муфти зчеплення].[Назва деталі], [Дефекти валу муфти зчеплення].[Назва дефекту], [Способи зміцнення валу].[Спосіб зміцнення]

FROM ([Дефекти валу муфти зчеплення] LEFT JOIN [Способи зміцнення валу] ON [Дефекти валу муфти зчеплення].[№ дефекту]=[Способи зміцнення валу].[№ дефекту]) INNER JOIN [Основні деталі муфти зчеплення] ON [Дефекти валу муфти зчеплення].[Код деталі]=[Основні деталі муфти зчеплення].[Код деталі].

WHERE ((([Способи зміцнення валу].[Твердість після зміцнення, HRC])>"60") AND ((([Способи зміцнення валу].[Глибина зміцненого шару, мм])>"0,4"))).

Згідно запиту на вибірку обрана цементация (табл. 5).

Таблиця 5

Вибір способу зміцнення вала

Вибір способу зміцнення валу : запит на вибірку		
Назва деталі	Назва дефекту	Спосіб зміцнення
Вал	Зношування шліців	Цементация

Для занесення нових способів зміцнення валу створено наведену нижче форму:

Form fields and controls:

- № дефекту:
- № способу усунення:
- Спосіб зміцнення:
- Твердість після зм:
- Глибина зміцнюван:
- Запись: из 2

Після визначення оптимального методу підвищення зносостійкості валу розроблювалась інфологічну та даталогічну схеми БД (відображення інфологічної схеми у даталогічну наведено на рис. 6) для визначення оптимального режиму зміцнення обраним методом.

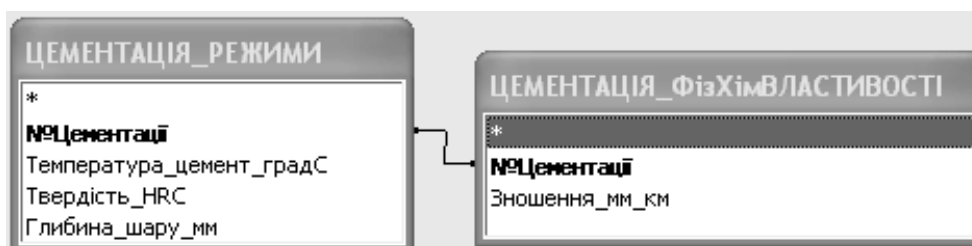


Рис. 6 – Даталогічна схема БД

При визначенні оптимального режиму цементації валу прийняті наступні постійні параметри:

- витримка цементації – 3,5 год.;
- температура гартування (вода) – 820 °С;
- витримка гартування – 3,5 хв.;
- температура відпустки (повітря) – 190 °С;
- витримка відпустки – 2,5 год.

Варіювались тільки параметри, відображені у табл. 6.

Таблиця 6

Режими цементації

ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ : таблиця			
№Цементациі	Температура_цемент_градС	Твердість_HRC	Глибина_шару_мм
1	925	62	1,0
2	982	61	1,38
3	1038	60	1,9
4	1095	58	2,68

Результати досліджень зносу цементованої сталі наведені у табл. 7.

Таблиця 7

Результати досліджень зносу цементованої сталі

ЦЕМЕНТАЦІЯ_ФізХімВЛАСТИВОСТІ	
№Цементациі	Зношення_мм_км
1	0,65
2	0,61
3	0,74
4	0,92

Для вибору оптимального режиму цементації використано мову програмування SQL:

```

SELECT_ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ_№Цементациі,
ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ_Температура_цемент_градС, ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ_Твердість_HRC,
ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ_Глибина_шару_мм,
ЦЕМЕНТАЦІЯ_ФізХімВЛАСТИВОСТІ_Зношення_мм_км
FROM_ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ INNER JOIN_ЦЕМЕНТАЦІЯ_ФізХімВЛАСТИВОСТІ_ON
ЦЕМЕНТАЦІЯ_РЕЖИМИ_№Цементациі=ЦЕМЕНТАЦІЯ_ФізХім
ВЛАСТИВОСТІ.№Цементациі
WHERE (((ЦЕМЕНТАЦІЯ_ФізХімВЛАСТИВОСТІ_Зношення_мм_км)="0,61"));

```

Результат виконання запиту представлений у табл. 8.

Таблиця 8

Оптимальний режим цементації

Оптимальний режим цементації : запит на вибірку				
№Цементациі	Температура_цемент_градС	Твердість_HRC	Глибина_шару_мм	Зношення_мм_км
2	982	61	1,38	0,61

Дослідження зносостійкості валу муфти зчеплення

Лабораторна установка дозволяє вивчити зміну характеристик зносу та фрикційних характеристик, а також температури поверхні зразка.

Установка (рис. 7) складається з робочої камери, станини, шпindelного вузла з приводом і пристроєм навантаження, апаратури вимірювання, запису та реєстрації характеристик тертя.

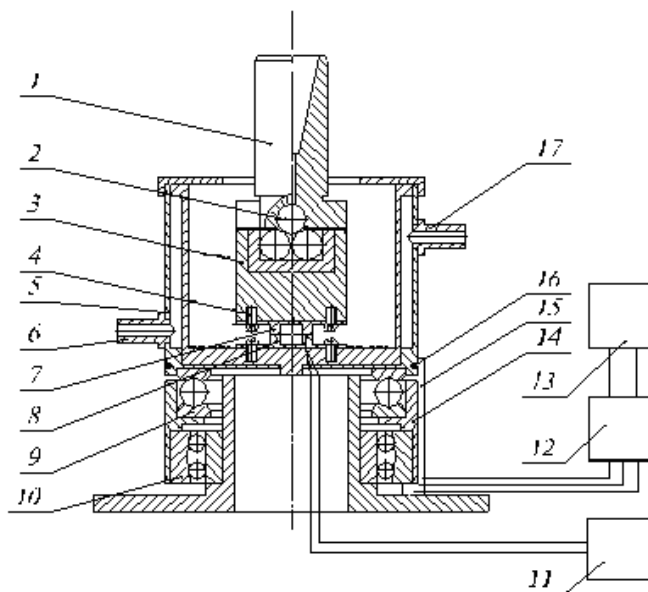


Рис. 7 – Установа для дослідження зносу:

- 1 – хвостовик;
- 2 – кульки;
- 3 – корпус зразка;
- 4 – гвинти;
- 5 – комірка;
- 6 – штуцер;
- 7 – зразок (верхній);
- 8 – зразок (нижній);
- 9 – упорний підшипник;
- 10 – сферичний підшипник (дворядний);
- 11 – потенціометр самопишучий електронний КСП-2;
- 12 – тензопідсилювач 8АНЧ-7М;
- 13 – потенціометр КСП-2;
- 14 – корпус підшипників;
- 15 – палець;
- 16 – трос;
- 17 – штуцер

Привод складається з електродвигуна змінного струму 4Ф112М2У3 частотою обертання $n_{\text{дв}} = 2900 \text{ хв}^{-1}$ і потужністю $P_{\text{дв}} = 7,5 \text{ кВт}$ і клинопасової 4-ступінчастої передачі. З урахуванням передаточного числа клинопасової передачі ($u = 4$) у хв^{-1} :

$$n_{\text{установки}} = n_{\text{дв}} \cdot u = 11600$$

Вертикальна сила та обертовий рух від хвостовика 1 (рис. 5.1) передається через чотири кульки 2 на корпус 3, до якого гвинтами 4 кріпиться верхній зразок 7, а нижній зразок 8 кріпиться двома гвинтами до комірочки 5 (встановлена на упорному підшипнику 9 і разом з корпусом 14 - на сферичному дворядному підшипнику 10). Куту фіксацію комірочки забезпечують тросом 16, який прикріплений до пальця 15. Одночасно реєструється момент сил тертя.

Об'єм робочого середовища складає $2 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$, а його температура контролюється електроконтактним термометром 18 і підтримується термостатом, вода з якого подається через штуцери 6 і 17.

Середня поверхнева температура зразка під час дослідження вимірюється самопишучим електронним потенціометром КСП-2 (11) на відстані 1 мм від поверхні тертя. Для отримання достовірних результатів використовується штучна термopара з постійним гарячим спаєм (кругла головка) з хромель-алюмелевих термоелектродів $\varnothing 0,5 \text{ мм}$.

Зносостійкість оцінювали силою тертя (моментом тертя) та лінійним зносом зразків. Силу тертя вимірювали під час випробувань безперервно тензометричним способом. Сигнал, який виникав при деформації наклеєних на палець 15 тензодатчиків, передавався через тензопідсилювач 8АНЧ-7М (12) на потенціометр КСП-2 (13). Коефіцієнт тертя обчислювався на основі діаграми моменту тертя (реєструється самопишучим приладом). Лінійне зношування зразка верхнього 7 оцінювали методом штучних баз на мікротвердомірі ПМТ 3. Шершавість робочих поверхонь зразків – $R_a = 0,63$. Нагрів зразків у місці контакту не перевищував $80 \text{ }^\circ\text{C}$, що виключало можливість значних структурних змін матеріалу.

Результати досліджень наведені на рис. 9.

Використовуючи отримані дані, визначено інтенсивність зношування досліджуваних зразків:

- для загартованої сталі 45X інтенсивність зношування в мкм/год:

$$I_{\text{Сталь 45X загартована}} = (0,816 - 0,603)/(2 - 0,1) = 0,213/1,9 = 0,1121.$$

- для цементованої сталі 20 інтенсивність зношування в мкм/год:

$$I_{\text{Сталь 20 цементована}} = (0,568 - 0,425)/(2 - 0,1) = 0,143/1,9 = 0,0753.$$

Порівняння залежностей середньої довжини діагоналі від тривалості експерименту для зразків з цементованої сталі 20 та загартованої сталі 45X

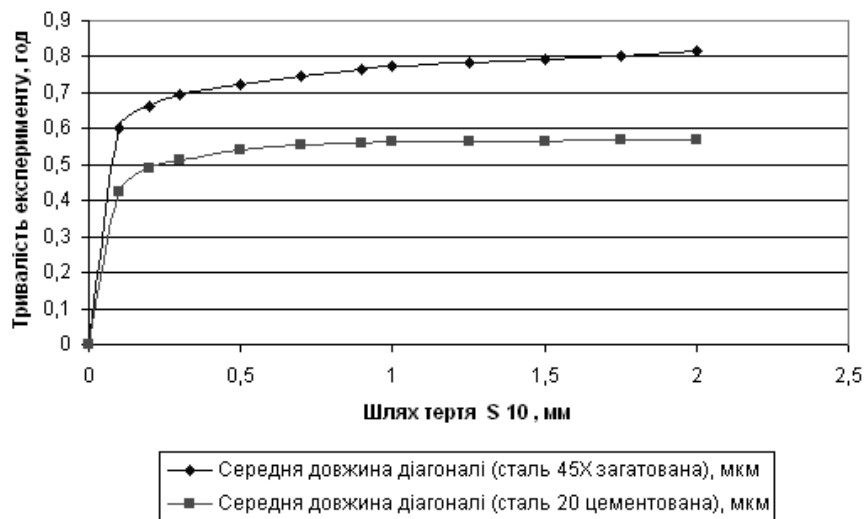


Рис. 9 – Результати досліджень

Отримані дані занесені у табл. 9.

Таблиця 9

Порівняння інтенсивностей зношування

Метод зміцнення	I , мкм/год.
Гартування (сталі 45X)	0,1121
Цементация (сталі 20)	0,0753

Таким чином, підвищення зносостійкості становить:

$$I_{\text{Сталь 40 гартована}} / I_{\text{Сталь 40 азотована}} = 0,1121 / 0,0753 = 1,49 \text{ р.}$$

Висновки

1. Наведені технічні характеристики зчеплення автомобіля, регулювання муфти й блокуючого механізму, технічне обслуговування зчеплення.
2. Досліджені деталі зчеплення за допомогою SolidWorks Simulation показано, що у випадку заміни сталі 45X на сталі 20 для виготовлення валу запас міцності достатній (економія на вартості матеріалу).
3. Застосуванням САПР для зміцнення валу муфти зчеплення встановлений оптимальний режим його цементации.

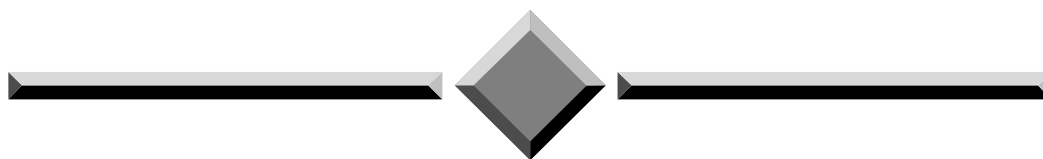
4. Отримані експериментальні результати підтверджують актуальність проведеного дослідження з використання SolidWorks Simulation.

5. Встановлено, що у випадку заміни загартованої сталі 45X на цементовану сталь 20 для виготовлення валу муфти зчеплення підвищення зносостійкості становитиме 1,49 разів.

Література

1. <http://www.knauf.spb.ru/modeli-traktorov/tractory-kd-35-i-kdp-35.html>
2. http://lib.susu.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000540021&dtype=F&etype=.pdf
3. <http://agrolib.ru/rasteniievodstvo/item/f00/s02/e0002070/index.shtml>
4. https://studbooks.net/2435815/tehnika/obzor_suschestvuyuschih_konstruktsiy
5. <http://www.sdelaemsami.ru/instrument/0001.html>
6. Сцепление транспортных и тяговых машин / Под ред. Ф.Г.Геккера, В.М.Шарипова, Г.М.Щеренкова. – М: Машиностроение, 1989. – 340 с.
7. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А.А. Алямовский. — БХВ-Петербург, 2012. — 448 с.
8. <http://imetal.in.ua/remont-traktoriv-i-avtomobiliv/remont-zcheplyennya>

Надійшла в редакцію 08.01.2019



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”
E-mail: tribosenator@gmail.com

Rudyk O.Yu., Dytynyuk V.O., Stebeletska N.M. **Modeling of working conditions and wear resistance of the vehicle's clutch shaft.**

It is shown that the basic characteristics of the quality of transport-technological machines and their aggregates are reliability and wear resistance, which reflect the service properties of these objects. The specified characteristics are laid down at designing and manufacture of cars, are realized in operation and restored with the help of repair. In the work, the methodology of the relationship between theory and experiment is complemented by the principles of computer simulation. This procedure made it possible to comprehensively study the behavior of complex systems, both natural and to test theoretical hypotheses. The application for studying the stress-strain state of solids of SolidWorks solid-state parametric modeling system has made it possible to construct an exact model of the component and the method of finite elements to determine the operational parameters for specific operating conditions. Investigation of the coupling shaft using SolidWorks Simulation showed that in the case of the replacement of 45X steel to steel 20, a safety margin was sufficient at the expense of the cost of the material. Using CAD to strengthen the shaft coupling clutch installed optimal mode of its cementation. The experimental results obtained confirm the relevance of the research on using SolidWorks Simulation. It is established that in the case of replacement of the tempered steel 45X on cement steel 20 for manufacturing of the coupling sleeve shaft increase the wear resistance will be 1,49 times.

Key words: car coupling coupling shaft, solid state modeling, safety margin, regeneration regimes, cementation, experimental wear test.

References

1. <http://www.knauf.spb.ru/modeli-traktorov/traktory-kd-35-i-kdp-35.html>
2. http://lib.susu.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000540021&dtype=F&etype=.pdf
3. <http://agrolib.ru/rasteniievodstvo/item/f00/s02/e0002070/index.shtml>
4. https://studbooks.net/2435815/tehnika/obzor_suschestvuyuschih_konstruktsiy
5. <http://www.sdelaemsami.ru/instrument/0001.html>
6. Scephlenie transportnyh i tyagovyh mashin. Pod red. F.G.Gekkera, V.M.SHaripova, G.M.SHCHerenkova. M: Mashinostroenie, 1989. 340 p.
7. Alyamovskij A.A. SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi. A.A. Alyamovskij. BHV-Peterburg, 2012. 448 p.
8. <http://imetal.in.ua/remont-traktoriv-i-avtomobiliv/remont-zcheplennya>