

УДК 629.424.3:621.436

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ ТЕПЛОВОЗНИХ ДИЗЕЛІВ Д49

К-т техн. наук К.В. Іванченко

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ВАЛОВ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ Д49

К-т техн. наук К.В. Іванченко

## FEATURES OF CALCULATED ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF THE DIESEL D49 CAMSHAFTS

Cand. of techn. science K. Ivanchenko

*Робота присвячена висвітленню особливостей розрахункового дослідження напружено-деформованого стану розподільного валу механізму газорозподілу енергетичних установок тепловозів з дизелем Д49 з використанням відповідної скінченно-елементної моделі конструкції. Доведено, що запропонований підхід до дослідження може бути використаний для проведення різноманітних розрахункових досліджень з визначення відповідних деформацій та напружень, що виникають в системі розподільного валу.*

**Ключові слова:** енергетична установка тепловозу; розподільний вал; кулачковий механізм газорозподілу, напружено-деформований стан.

*Работа посвящена освещению особенностей расчетного исследования напряженно-деформированного состояния распределительного вала механизма газораспределения энергетических установок тепловозов с дизелем Д49 с использованием соответствующей конечно-элементной модели конструкции. Доказано, что предложенный подход к исследованию может быть использован при проведении разнообразных расчетных исследований по определению соответствующих деформаций и напряжений, возникающих в системе распределительного вала.*

**Ключевые слова:** энергетическая установка тепловоза, распределительный вал, кулачковый механизм газораспределения, напряженно-деформированное состояние.

*The article is dedicated to coverage of the features of calculated analysis of the stress-strain state of the camshaft timing power plants with diesel locomotives D49 using the proper finite element model of the structure. The relevance of activities aimed at stressed-strained state for determination of contact stresses in a pair of "cam pusher" is confirmed. The distribution of contact pressures were estimated by modern software systems calculation using finite element method, which by-turn requires the step-by-step creation of geometric and finite-element model of the structure. It is proved that the proposed approach to the analysis can be used to conduct a variety of computational studies to determine the appropriate strains and stresses occurring in the camshaft. The results can be used in subsequent calculations to determine the life time and reliability of the construction as of serial camshafts and for research aimed at developing new improved camshafts.*

**Keywords:** diesel power plant, camshaft, cam timing, strain-stress state.

**Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень у напрямку її вирішення.** Дослідження особливостей конструкції енергетичних установок тепловозів з V- подібними чотиритактними дизелями Д49 (ЕУТ Д49) (обладнано понад 50% магістральних тепловозів експлуатаційного парку Укрзалізниці) [1], показало, що одним з найбільш важливих вузлів механізму є розподільний вал (РВ), оскільки його функціональним призначенням є керування процесами паливоподачі і газообміну в циліндрах енергетичних установок тепловозів. Тому удосконалення конструкції розподільних валів на основі відповідних технологій проектування і ремонту є одним з перспективних напрямків підвищення техніко-економічних показників енергетичних установок тепловозів. Найбільш раціональним шляхом рішення виділеного науково-практичного завдання є оптимізація конструктивних параметрів робочих профілів газорозподільних кулачків, що потребує використання методів профілювання вискоєфективних без ударних газорозподільних кулачків. В той же час дослідження за вказаним напрямком повинні проводитись з урахуванням характеристик функціонування механізмів приводу впускних (ВПК) та випускних (ВИПК) клапанів, а також деформацій та напружень (в тому числі контактних), що виникають в конструкції під час експлуатації. Таким чином, детальний аналіз

контактних напружень в парі «кулачок – ролик штовхача» може використовуватися як при визначенні рівнів міцності серійних валів, так і для досліджень, спрямованих на розробку нових вдосконалених розподільних валів. Представлені матеріали обґрунтували актуальність робіт, спрямованих на проведення розрахункового дослідження системи розподільного валу з метою визначення її напружено-деформованого стану.

**Мета статті і викладення основного матеріалу.** Метою роботи є висвітлення особливостей розрахункового дослідження напружено-деформованого стану розподільного валу механізму газорозподілу енергетичних установок тепловозів з дизелем Д49 з використанням відповідної скінченно-елементної моделі конструкції.

На першому етапі рішення задачі було проаналізовано конструкцію розподільного валу ЕУТ Д49. Особливістю конструкції розподільних валів є те, що паливні і газорозподільні кулачки знімні (рис.1). Приводна втулка 7, кільця 6 і 5 утворюють опорно-упорну шийку, а втулки 9 – опорні шийки розподільних валів. Втулки 9, впускні 2, випускні 3 і паливні 4 кулачки складаються з двох частин, які закріплюються на валу 8 гайками 1. Гайки 1 стопоряться гвинтами. Кулачки 2, 3, 4 фіксуються на валу 8 шпонками в положеннях, що відповідають порядку роботи циліндрів [2, 3].

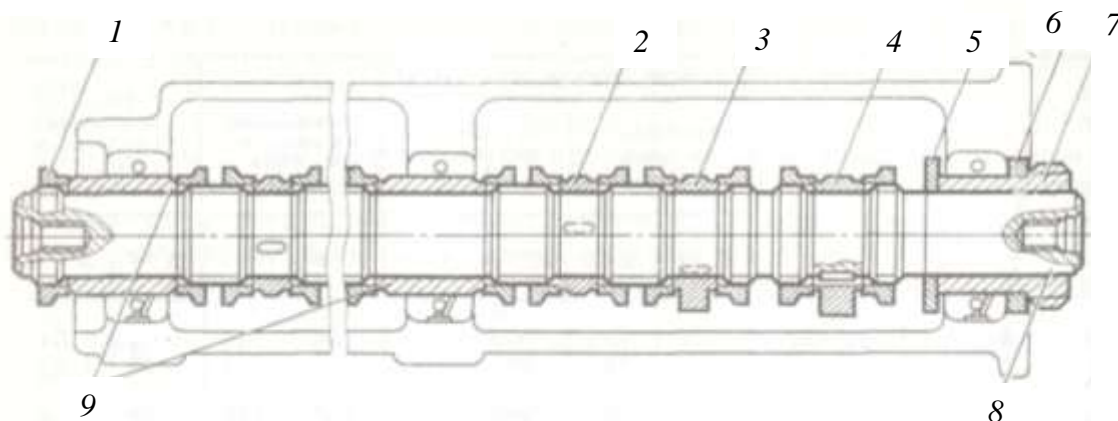


Рис.1. Розподільний вал ЕУТ Д49: 1- гайка; 2, 3, 4 - відповідно впускний, випускний та паливний кулачки, які працюють на два циліндри лівого та правого рядів; 5,6 – кільця опорно-упорної шийки, 7 – приводна втулка; 8 – тіло валу; 9 – втулка

Нижче представлені результати дослідження технічного стану розподільних валів, а також вузлів і деталей механізмів приводу ВПК і ВИПК ЕУТ Д49 (1А-5Д49 вик.2) з пробігом тепловозів 2ТЕ116 більше 1 млн. км., які проводились фахівцями Проектно-конструкторсько-технологічного бюро по локомотивам (ПКТБл) в депо Гребінка при проведенні третього ПР-3 [4, 5].

Дослідження виконувались шляхом дефектоскопії, вимірювання та огляду. Встановлено, що безпосередньо саме тіло РВ 8 (рис.1) після напрацювання 1,1...1,2 млн. км. не мало дефектів, що потребують ремонту. Не мали пошкоджень також гайки 1 і різьба. В той же час на робочих поверхнях більшості газорозподільних 2, 3 і паливних кулачків 4 відзначені суттєві зноси і пошкодження (рис.2). Разом з пошкодженням газорозподільних кулачків відмічені суттєві зноси і пошкодження більшості деталей механізмів приводу ВПК і ВИПК, які розміщені в лотку РВ.

За оцінками спеціалістів ПКТБл, а також за результатами пошукових досліджень, що проводились в УкрДАЗТ, виявлено, що основними причинами суттєвих пошкоджень поверхонь робочих профілів кулачків є високі контактні напруження в парі «кулачок-ролик».

Наведені вище матеріали підтвердили актуальність робіт, спрямованих на дослідження напружено-деформованого

стану з метою визначення контактних напружень в парі «кулачок-ролик штовхача». Для визначення розподілення контактних навантажень було запропоновано застосувати сучасні програмні комплекси розрахунку, які використовують метод скінчених елементів, що в свою чергу потребує поетапного створення геометричної та скінченно-елементної моделей конструкції.

технічний стан тепловозів у цілому залежно від умов їхньої експлуатації.

**Висновки з дослідження й перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.**

1. Встановлено, що для аналізу фрактальних часових рядів потрібно не велика кількість спостережень, а часовий ряд зі збільшеною довжиною або збільшеною кількістю інтервалів. При цьому важливо не те, яка досліджується кількість спостережень, а те, скільки періодів (інтервалів) охоплюють ці дані. Такий підхід значно відрізняється від стандартного статистичного аналізу, де більш важлива кількість спостережень, ніж довжина досліджуваного часового ряду.

2. На підставі розрахунку й оцінки показника Херста за часовим рядом паливної економічності тепловозів запропонована організація моніторингу та створений метод для розрахунку залишкового ресурсу паливної апаратури, що забезпечує планування і проведення її додаткового регулювання й ремонту.

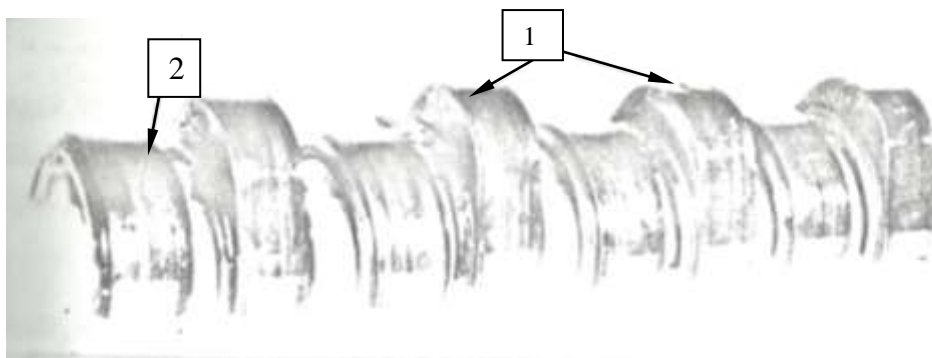


Рис.2. Розподільний вал ЕУТ Д49 після 1,2 млн. км пробігу тепловозу 2ТЕ116: 1 – випрацювання поверхонь робочих профілів до  $0,3$  мм; 2 – задирання циліндричної частини кулачка

Наступним етапом було створення геометричної моделі конструкції (рис.3а). Задача вирішувалася для ділянки розподільного валу, яка працює на один циліндровий модуль. Ділянка валу будувалася в натуральну величину на основі креслень валу та параметрів робочого профілю газорозподільних кулачків за допомогою САD програми Ansys [6, 7]. Було прийнято, що ділянка валу, яка розглядається, будується як суцільна, незважаючи на те, що конструктивно кожен кулачок складається з двох частин.

Особлива увага приділялася побудові профілів кулачків. Робочий профіль тангенціального кулачка окреслюється дугою початкової окружності радіуса  $r_0$ , двома відрізками прямої (відповідають ділянці додатних прискорень штовхача), двома дугами окружності радіуса  $r$  (відповідають ділянці від'ємних прискорень штовхача) і дугою окружності радіуса  $R_1$  (ділянка верхнього вистюгу штовхача).

Був врахований той факт, що профіль кулачка є симетричною фігурою. Це дало можливість будувати лише половину контуру, а після цього використати операцію дзеркального відображення об'єктів. Таким чином, за відомими радіусами за допомогою операції побудови базових елементів створювалися половини дуг потрібного розміру, з'єднувальні прямі та осьова лінія, яка використовувалася в якості лінії симетрії. Отриманий після дзеркального відображення контур профілю витягувався на потрібну довжину – ширину кулачка.

Також враховувався той факт, що кулачки розподільного валу повернуті на відповідний кут один відносно іншого. В рамках побудови геометричної моделі це виконувалось шляхом повороту осевої лінії (лінії симетрії профілю кулачка) на відповідний кут та прив'язки до неї спеціально створеної локальної системи координат.

На останньому етапі проводилось розбиття отриманої геометричної моделі на скінченні елементи визначеної величини. В якості скінченних елементів використовувалися тетраедри з десятьма вузлами (SOLID186) [7], які дозволяють більш детально описати геометричні особливості конструкції. Місця розташування, порядок та взаємозв'язок створених елементів моделі визначаються автоматично програмним комплексом. В результаті дискретизації було отримано 124537 елементів та 185844 вузлів скінченно-елементної моделі (рис. 3б).

Також при моделюванні враховувалися характеристики матеріалу, з якого виготовлені газорозподільні кулачки. Газорозподільні кулачки і ролики коромислових штовхачів енергетичних установок тепловозів з дизелем Д49 виготовляються з високоякісної легованої сталі 18Х2Н4МА [8]. При цьому забезпечується твердість поверхневого шару кулачка  $HRC_{\text{э}} 57...63$ , серцевини -  $HRC_{\text{э}} 35$  ( $HRC_{\text{э}}^{**} 50$ ). В цьому випадку границя короткочасної контактної витривалості визначається відповідно до відомих

рекомендацій як  $[\sigma_H]_{\max} = 40 \cdot HRC\epsilon^{**}$  і складає  $[\sigma_H]_{\max} = 2000 \text{ МПа}$ .

Оскільки метою розрахунків на даному етапі дослідження було лише отримання контактних напружень в парі «кулачок-ролик штовхача», для спрощення задачі закріплення моделі моделювалось у місцях закріплення ділянки розподільного валу. В подальшому для врахування кутових деформацій розподільного валу планується коректування умов закріплення у відповідності до поставленої мети розрахунку.

Перевірка адекватності отриманої моделі проводилась шляхом варіювання розміру скінченного елемента та визначення

напружено-деформованого стану шляхом прикладення середнього навантаження на газорозподільні та топливний кулачки. Отримані результати дозволяють провести оцінку дискретизації скінченно-елементної моделі на збіжність задачі статичної міцності. Були розраховані абсолютна та відносна похибки, як порівняння значень максимального еквівалентного напруження моделі з меншою величиною скінченного елемента та моделі з більшою величиною скінченного елемента. Отримана похибка не перевищувала 4%, тобто є меншою за допустиму, що підтверджує нормальну збіжність рішення. Саме ця модель була прийнята для подальших розрахунків.

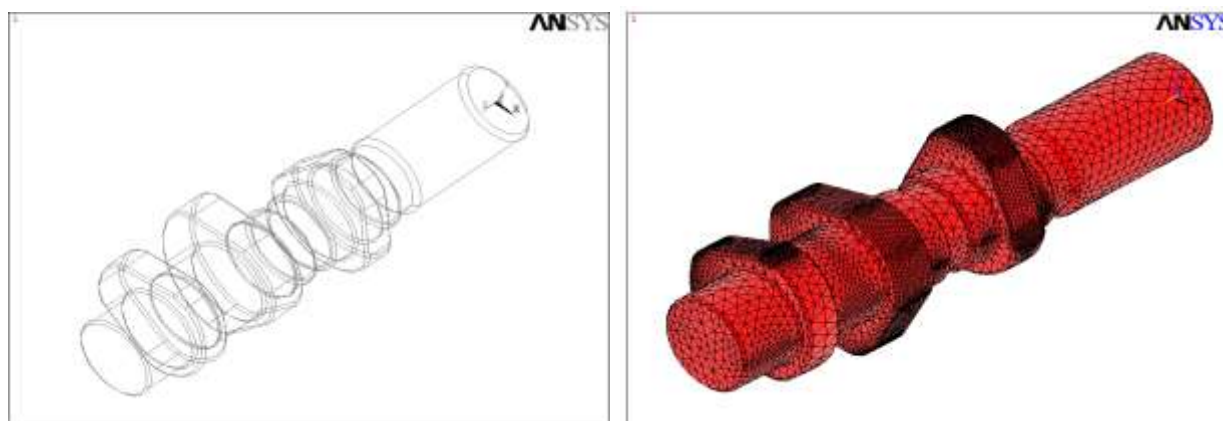


Рис. 3. Геометрична (а) та скінченно-елементна (б) моделі ділянки розподільного валу ЕУТ Д49

**Висновки і перспективи використання.** Запропонований підхід до розрахункового дослідження напружено-деформованого стану, який базується на використанні розробленої скінченно-елементної моделі ділянки розподільного валу механізму газорозподілу ЕУТ Д49, може бути використаний для проведення різноманітних розрахункових досліджень з

визначення відповідних деформацій та напружень в системі розподільного валу. Отримані результати можуть бути використані в подальших розрахунках для визначення ресурсу та надійності роботи конструкції як серійних валів, так і для досліджень, спрямованих на розробку нових вдосконалених розподільних валів.

### Список використаних джерел

1. Астахова К.В. Аналіз особливостей конструкції та функціонування розподільних валів транспортних дизелів/ К.В. Астахова // Зб.наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2014. – Вип. 145. – С. 120-125.
2. Тепловозные дизеля типа Д49 / Под ред. Е.А. Никитина. – М.: Транспорт, 1982. – 255 с.
3. Симсон А.Э. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания / А.Э.Симсон, А.З.Хомич, А.А.Куриц и др. // – М.: Транспорт, 1987. –536 с.

## Теплові двигуни

---

4. Исследование состояния ремонтного фонда дизелей типа Д49, подлежащих капитальному ремонту. Часть 5. Привод распределительного вала. Лоток распределительного вала. Распределительный вал. Антивибратор маятниковый и демпфер вязкостный. Водяной насос. – Полтава: Проектно-конструкторско-технологическое бюро по ремонту локомотивов, 1990. – 71 с.

5. Исследование состояния ремонтного фонда тепловозов 2ТЭ116 поступивших в капитальный ремонт. Этап 2. Износы и дефекты коленчатого вала и блока дизеля 1А-5Д49. Полтава: Проектно-конструкторско-технологическое бюро по ремонту локомотивов, 1994. – 27 с.

6. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование / К.Басов — Москва: ДМК Пресс, 2006. — 240 с.

7. Басов К. А. ANSYS для конструкторов / К.Басов — М.: ДМК Пресс, 2009. — 248 с.

8. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов./ А.С.Зубченко, М.М.Колосков, Ю.В.Каширский и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Тимофеева Л.А.

---

*Іванченко Ксенія Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри механіки і проектування машин Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-52. E-mail: [xeniya.ivanchenko@gmail.com](mailto:xeniya.ivanchenko@gmail.com)*

*Ivanchenko Kseniya Viktorivna, cand. of techn. science, lecturer, department Mechanics and Machine Design, Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-52. E-mail: [xeniya.ivanchenko@gmail.com](mailto:xeniya.ivanchenko@gmail.com)*