

## ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ ПОКРИТТІ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА АВТОМОБІЛЯ

*Запропоновано спосіб вимірювання залишкових напружень у покриттях відновлених колінчастих валів автомобілів моделі ЗІЛ-162. Отримана порівняльна характеристика значень залишкових напружень у відновлених і нових колінчастих валах автомобілів моделі ЗІЛ-162.*

**Ключові слова:** відновлювальне покриття, колінчастий вал, плазмове напильовання, залишкові напруження, тензодатчики, аналого-цифровий перетворювач.

### Вступ

Експлуатація автомобілів включає в себе надійну роботу всіх їх вузлів та елементів. Серед основних вузлів автомобілів на першому місці стоять ходова частина та двигун. Тривалість експлуатації відновлених колінчастих валів автомобілів залежить в першу чергу від величини залишкових напружень у тих частинах валів, які піддаються найбільшому зношенню у процесі їх роботи (мова йде про шатунні і корінні шийки колінчастого валу).

Механізм вимірювання залишкових напружень у відновлювальних покриттях – складний процес, точність експериментальних даних досить суттєво може впливати на правильність кінцевого аналітичного розрахунку. У літературі [1, 2] наведені приклади вимірювання залишкових напружень безпосередньо у самому матеріалі шатунної шийки. Це процес вимірювання характеристик деталей автомобіля у спеціальній заводській лабораторії. В автомобільній промисловості, зокрема на автотранспортних підприємствах, а також на окремих станціях технічного обслуговування проводять відновлення робочих характеристик колінчастого валу до певної технологічної норми (так звана металізація поверхневого зношено шару частин колінчастого валу). Крім того після процесу відновлення шатунну шийку колінчастого валу піддають процесу шліфування (до так званого, капітального ремонтного розміру № 1 або № 2). На фоні цих двох процесів – відновлення і подальшого шліфування, проходить складний механізм утворення залишкових напружень у відновлювальному покритті. Проте літературні дані [1, 2] про збереження цілісності нанесеного покриття, його експлуатаційної характеристики протягом певного часу обмежуються лише поняттям «число гарантованого кілометро-пробігу» і не пояснюють суті фізичного процесу впливу залишкових напружень на тривалість експлуатації колінчастого валу.

**Мета роботи:** отримати порівняльну характеристику значень залишкових напружень у відновлених та нових колінчастих валах автомобілів моделі ЗІЛ-162.

### Обладнання, матеріали та методика досліджень

Запропонований метод вимірювання внутрішніх напружень, на думку авторів даної роботи, пропонується як оціночний критерій щодо експлуатації відновленого колінчастого валу автомобіля. Етапи процесу (від нанесення відновлювального покриття до вимірювання залишкових напружень у ньому) представлені на рис. 1–3.

У даній роботі розглядається метод вимірювання залишкових напружень у системі «відновлювальне покриття – матеріал основи (власне колінчастий вал)» після остаточної обробки (шліфування) шийки колінчастого валу двигуна пожежного автомобіля ЗІЛ-130 під ремонтний розмір № 1.

Суть даного методу полягає у використанні тензодатчиків як головних реєстраторів залишкових напружень у шарі відновлювального покриття з подальшою комп'ютерною обробкою даних у режим реального часу. Залишкові напруження у відновлювальному покритті вимірювали як на шатунній, так і на корінній шийках колінчастого валу.

Залишкові напруження у відновлювальному покритті, нанесеному на шатунну шийку колінчастого валу, знаходили за емпіричними формулами [3, 4]:

$$\sigma_{3H} = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{d_3}{d_1} \cdot \Delta \epsilon \cdot \left( \frac{\frac{\delta^2}{d_2 - d_1} - \frac{\delta}{2}}{\frac{d_2 - d_1}{2}} \right), \quad (1)$$

де  $\sigma_{3H}$  – залишкові напруження у відновлювальному покритті, нанесеному на шатунну шийку колінчастого валу, МПа;

$E$  – модуль повздожньої пружності у відновлюваль-  
ному покритті і основі, МПа;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу відновлюваль-  
ного покриття і основи, відн. од.;

$d_1$  – діаметр шийки колінчастого валу до напилю-  
вання відновлювального покриття, м;

$d_2$  – діаметр шийки колінчастого валу після напи-  
лювання відновлювального покриття, м;

$d_3$  – діаметр шийки колінчастого валу після процесу  
шліфування напиленого відновлювального покриття, м;

$\delta$  – товщина покриття на діаметр шийки колінча-  
стого валу, м.

При цьому передбачалась осьова симетрія розпо-  
ділу залишкових напружень, а також їх постійність по  
довжині зразка та лінійний розподіл по товщині. Зчиту-  
вання сигналів, які надходили з тензодатчиків, здійсню-  
валося за допомогою аналого-цифрового перетворювача  
з подальшою обробкою результатів на ПЕОМ.

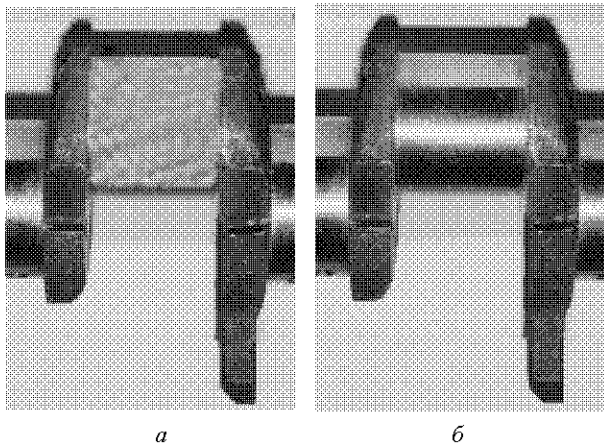


Рис. 1. Фрагмент колінчастого валу:

$a$  – після напилювання відновлюваного покриття;  $b$  – після  
процесу шліфування

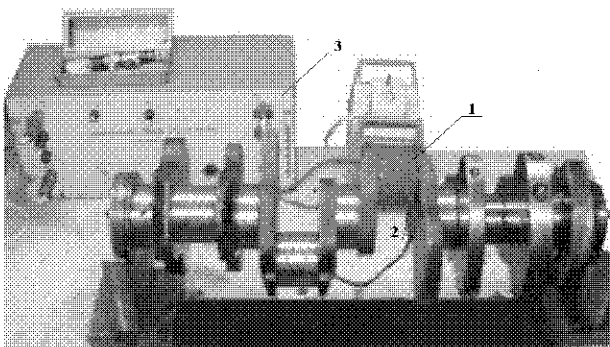


Рис. 2. Схема процесу вимірювання тензодатчиками  
величини відносної деформації зовнішньої циліндричної  
поверхні у відновлювальному покритті:

1 – об'єкт дослідження (шатунна шийка колінчастого валу  
із нанесеним відновлювальним покриттям); 2 – тензодат-  
чики; 3 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП)  
сигналів

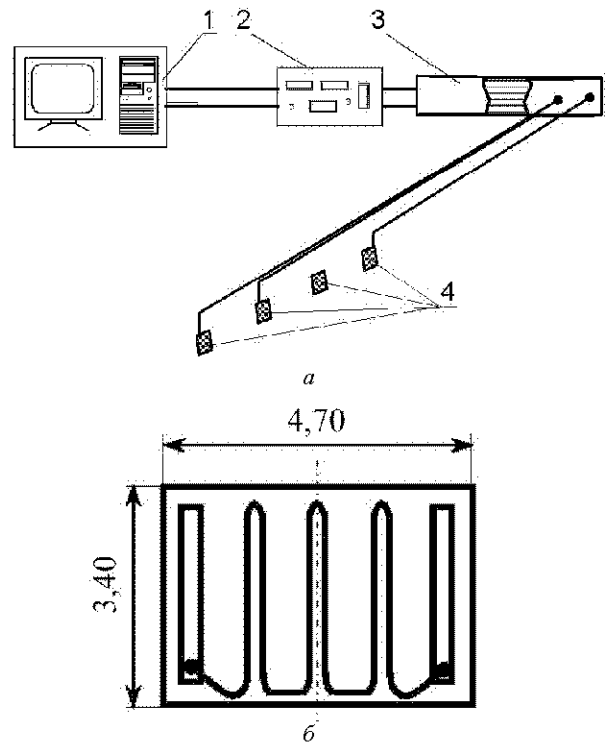


Рис. 3. Компонувочна схема процесу вимірювання  
тензодатчиками величини відносної деформації зовніш-  
ньої циліндричної поверхні у захисному покритті:

$a$  – (1 – ПЕОМ; 2 – аналогово-цифровий перетворювач  
(АЦП) сигналів; 3 – загальна шина приймання сигналів;  
4 – тензодатчики);  $b$  – загальний вигляд тензодатчика  
(збільшено)

Покази з тензодатчиків знімалися в два етапи (на нанесе-  
ному шарі відновлювального покриття після процесу  
шліфування і на новому колінчастому валу). Величина  
 $\Delta \epsilon$  була розрахована за такими формулами:

$$\Delta \epsilon = \frac{1}{K} \ln(\xi(\epsilon) + 1), \quad (2)$$

де  $\xi(\epsilon)$  – функція перетворення деформації при н.у.

$$\xi(\epsilon) = \frac{\Delta R}{R_{II}}, \quad (3)$$

де  $\Delta R = R_K - R_{II}$ ,

де  $R_{II}$  – початкове значення опору тензодатчика, Ом;

$R_K$  – опір тензодатчика після деформації, Ом;

$K$  – чутливість тензодатчика при н.у.

Величину похибки при вимірюванні величин  $R_K$  і  
 $R_{II}$  визначали як функцію інерційності (повзучості)  
тензодатчиків за формулою

$$P_{TD} = 1,5 \cdot \left( e^{-\frac{\tau}{1,7} \cdot 10^{-3}} - 1 \right) + \left( e^{-\frac{\tau}{2,8} \cdot 10^{-6}} - 1 \right), \quad (4)$$

де  $\tau$  – час випробування матеріалу колінчастого валу  
на залишкову деформацію, с.

Значення коефіцієнтів  $\mu$  та  $E$  були визначені інтегрально для всіх досліджених зразків у цілому (для кожного типу відновлювального покриття) у лабораторно-заводських умовах із використанням комплексних методик [5].

### Результати роботи

Результати роботи наведені в табл. 1, 2. Значення залишкових напружень для відновленого колінчастого валу автомобіля ЗИЛ-162 складо 1,04 МПа, що на 7 % менше значення залишкових напружень у поверхневому шарі нового колінчастого валу (1,36 МПа). Результати чисельного експерименту по встановленню оптимальної товщини покриття (на діаметр корінної шийки) подано на рис. 4.

З рис. 4 видно, що крива значень залишкових напружень має постійно зростаючий вигляд. Для вибору оптимальної (мінімально-допустимої) товщини покриття виберемо згідно з нормативною документацією (ГОСТ 21616-76) значення 2 мм. Це значення включає в себе адекватне узгодження мінімальної, але в той

же час достатньої товщини відновлювального покриття (включаючи усі його функції – силу адгезійного та когезійного зчеплення, пористість) із витратами напиленого матеріалу (параметр КВМ – коефіцієнту використання матеріалу).

### Висновки

1. Встановлено мінімально-допустиме значення товщини напиленого шару відновлювального покриття 2 мм на корінній шийці колінчастого валу.

2. Значення залишкових напружень у системі «матеріал основи – відновлювальне покриття» відновленого колінчастого валу, у порівнянні з новим, зменшилося на 7 % в результаті компенсації напруженого стану у системі «матеріал основи-відновлювальне покриття». Випробування серії (14 шт.) відновлених колінчастих валів, які були встановлені на автомобілях ЗИЛ-160 розпочато в Черкаській області. Економічну доцільність від запропонованої технології щодо її можливого впровадження на ряді підприємств, автори статті планують опублікувати в наступній науковій праці.

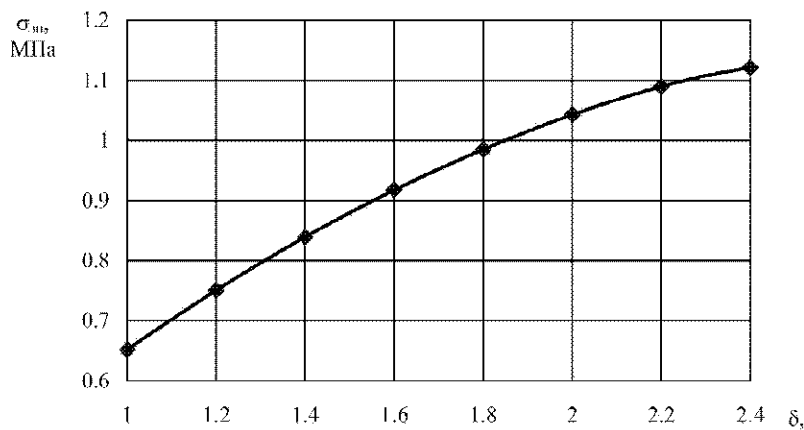


Рис. 4. Залежність значень залишкових напружень від товщини напиленого шару відновлювального покриття

Таблиця 1 – Технологічні параметри відновлювальної частини колінчастого валу та тензодатчика опору

Діаметр корінної шийки, мм			Одноосьовий тензодатчик опору (ГОСТ 21616-76) [6]			
зношеного колінчастого валу	напиленого колінчастого валу	відшліфованого колінчастого валу	марка	чутливість до деформацій, ум. од.	габарити, мм	
					гратка	підложка
64,12	66,12	66,00	КФ4П1-10-200-АГ-12	4,15	1,50 × 1,20	4,70 × 3,40

Таблиця 2 – Результати вимірювання залишкових напружень у відновленому колінчастому валу

Модуль Юнга $E$ , МПа	Коефіцієнт Пуассона $\mu$ , відн. од.	Значення опору тензодатчика		Значення залишкових напружень, МПа
		початкове $R_{Tb}$ , Ом	кінцеве $R_{Tc}$ , Ом	
120	0,22	410	384	1,36 (для нового колінчастого валу)
122	0,21		390	1,04 (для відновленого колінчастого валу)

## Список літератури

1. Харламов Ю. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагянц. – Луганск : Изд-во Восточно-укр. национ. ун-та им. В. Даля, 2003. – 389 с.
2. Орлов В. И. Газотермическое напыление коррозионно-стойких и износостойких материалов / В. И. Орлов. – Л. : ЛДНТП, 1986. – 142 с.
3. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / [А. Ф. Ильющенко, С. П. Кундас, А. П. Достанко и др.]. – Минск : Научный центр исследований политики и бизнеса «Арнита-Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 544 с.
4. Рево С. Л. Исследование плотности дислокаций и энергии активации диффузионных процессов методом термоЭДС в многослойных материалах / С. Л. Рево, В. С. Копань, А. И. Майборода // Порошковая металлургия. – 1981. – № 4. – С. 61–65.
5. Голуб Н. В. Термоусталостное разрушение защитных покрытий в зависимости от физико-механических свойств системы покрытие-подложка / Н. В. Голуб // Труды науч.-практ. конф. – Минск : МПИ, 1990. – С. 24–29.

Одержано 12.11.2012

**Губарь Е.Я., Пономаренко А.М., Шматков В.Ю., Канашевич Г.В. Измерение остаточных напряжений в восстановительном покрытии коленчатого вала автомобиля**

*Предложен способ измерения остаточных напряжений в покрытиях восстановленных коленчатых валов автомобилей модели ЗИЛ-162. Получена сравнительная характеристика значений остаточных напряжений в восстановленных и новых коленчатых валах автомобилей модели ЗИЛ-162.*

**Ключевые слова:** *восстановительное покрытие, коленчатый вал, плазменное напыление, остаточные напряжения, тензодатчики, аналого-цифровой преобразователь.*

**GubarYe., PonomarenkoA., ShmatkovV., Kanashevych G. Measurement of residual stresses in car crank-shaft renewable coating**

*The method for measuring residual stresses in the restored crankshaft coatings of car models ZIL-162 is suggested. The comparative characteristics of residual stresses in the restored and new crankshafts of car models ZIL-162 has been received.*

**Key words:** *restorative cover, crankshaft, plasma spray, residual stresses, load cells, analog-to-digital converter.*

УДК 539.3

А. В. Ревенко

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

**ВПЛИВ РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У В'ЯЗКОПРУЖНОМУ ВКЛЮЧЕННІ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ У ПЛАСТИНІ**

*Розв'язано задачу про встановлення напруженого стану пластини з включенням із в'язкопружного матеріалу. Для тонкого включення еліптичної форми і матеріалу з реологічними властивостями узагальненого матеріалу Кельвіна одержано розв'язок у замкнутому аналітичному вигляді. Знайдено напруження у включенні та їх концентрацію в пластині.*

**Ключові слова:** *включення, пластина, в'язкопружний матеріал, модель Кельвіна.*

**Вступ**

При відновленні несучої здатності пошкоджених тріщинами конструкцій тривалої експлуатації знаходить все ширше застосування технологія, яка полягає у заповненні дефектних зон рідкими матеріалами, здатними тверднути через певний час. Розрахунки короточасної міцності, підсилені таким способом елементів конструкцій свідчать про ефективність цієї методики [1].

Ін'єкційними матеріалами, як правило, є високомолекулярні сполуки (поліуретани, акрили, епоксидні смоли), несуча здатність яких при заданому навантаженні міняється з часом. Тому важливим є дослідження як короточасної [2], так і довготривалої міцності відновлених елементів конструкцій [3–5].

Встановимо релаксацію напружень у включенні із в'язкопружного матеріалу, реологічні властивості якого