

УДК 620.178.3:531.111

*Канд. техн. наук Б. Ф. Федоренко, В. С. Лукьянов*

*АО «Мотор Сич», г. Запорожье*

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ВЫНОСЛИВОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВАЛОВ

*В статье рассмотрена возможность оценки выносливости валов с использованием метода физического моделирования. Предложены критерии подобия для построения модели вала. Проанализированы результаты имеющихся испытаний геометрически подобных моделей вала горизонтально–ковочной машины и предложены размеры моделей, выполненных с учетом критериев подобия, имеющих физический смысл. Критерии подобия получены с использованием метода анализа размерностей.*

**Ключевые слова:** выносливость, анализ размерностей, модель, физическое моделирование.

### Введение

При эксплуатации горизонтально–ковочных машин (ГКМ) отмечены усталостные поломки эксцентриковых и коленчатых валов [1].

Учитывая большие размеры реального вала, провести испытание его на выносливость с использованием стандартного оборудования не представляется возможным. А создание специального оборудования для проведения испытаний, согласно ГОСТ 2860, большого количества эксцентриковых валов является нецелесообразным.

Для этой цели целесообразно изготовить модели, размеры которых позволяют использовать для испытаний на выносливость стандартное оборудование и методику обработки результатов, что позволит выполнить оценку предела выносливости реального вала.

В [2] предложено решение поставленной задачи для эксцентрикового вала ГКМ (далее по тексту – вала) и представлены результаты выполненных работ.

Проведено испытание на выносливость геометрически подобных моделей (далее по тексту – моделей), изготовленных из стали 40ХНМА с учетом технологии изготовления вала, и уменьшенных в опасном сечении в 67, 40, и 5 раз по отношению к валу. Форма и размеры моделей в сопоставлении с валом приведены на рис. 1.

Испытание на выносливость моделей проведено при комнатной температуре в условиях аналогичных работе валов – переменного кругового изгиба с постоянным по длине вала изгибающим моментом.

Представленные в таблице 1 величины пределов выносливости моделей показали, что предложенные в [2] модели имеют различную величину предела выносливости, а это противоречит условиям моделирования напряженного состояния, показанным в работах В. А. Веникова, С. Дж. Клайна, Л. И. Седова [3–5].

При испытании моделей для оценки напряженного состояния вала (предела выносливости при динамическом нагружении), величина предела выносливости должна быть одна для всех типоразмеров изготовленных моделей и соответствовать величине предела выносливости вала.

Настоящее исследование посвящено анализу результатов проведенных работ, показанных в [2], и созданию физически подобной модели для оценки предела выносливости вала, работающего в условиях переменного кругового изгиба с постоянным по длине вала изгибающим моментом.

### Методика исследования

В работах [3–5] показано, что физические процессы будут подобны при равенстве значений безразмерных комплексов (критериев подобия), составленных из заданных по условиям величин, описывающих данный процесс. Это единственное условие, необходимое (и достаточное) для подобия физических процессов.

Ранее [6] авторами был использован предложенный метод для оценки напряженного состояния (построение эпюр напряжений) малоразмерной лопатки турбины (материал ВЖЛ12У) газотурбинного двигателя, когда возникает необходимость в точном определении напряжений в наиболее напряженных зонах пера. Учитывая размеры и условия размещения датчиков, разместить их в местах наибольших напряжений на малоразмерной лопатке не представляется возможным, поскольку это зоны у входных и выходных кромок профиля пера лопатки.

В этом исследовании ставилась задача создать физически подобную модель лопатки из материала АЛ-5, имеющую размеры, которые позволяют установить на ее поверхности, включая радиусные переходы, достаточное количество стандартных датчиков, а также провести испытание с

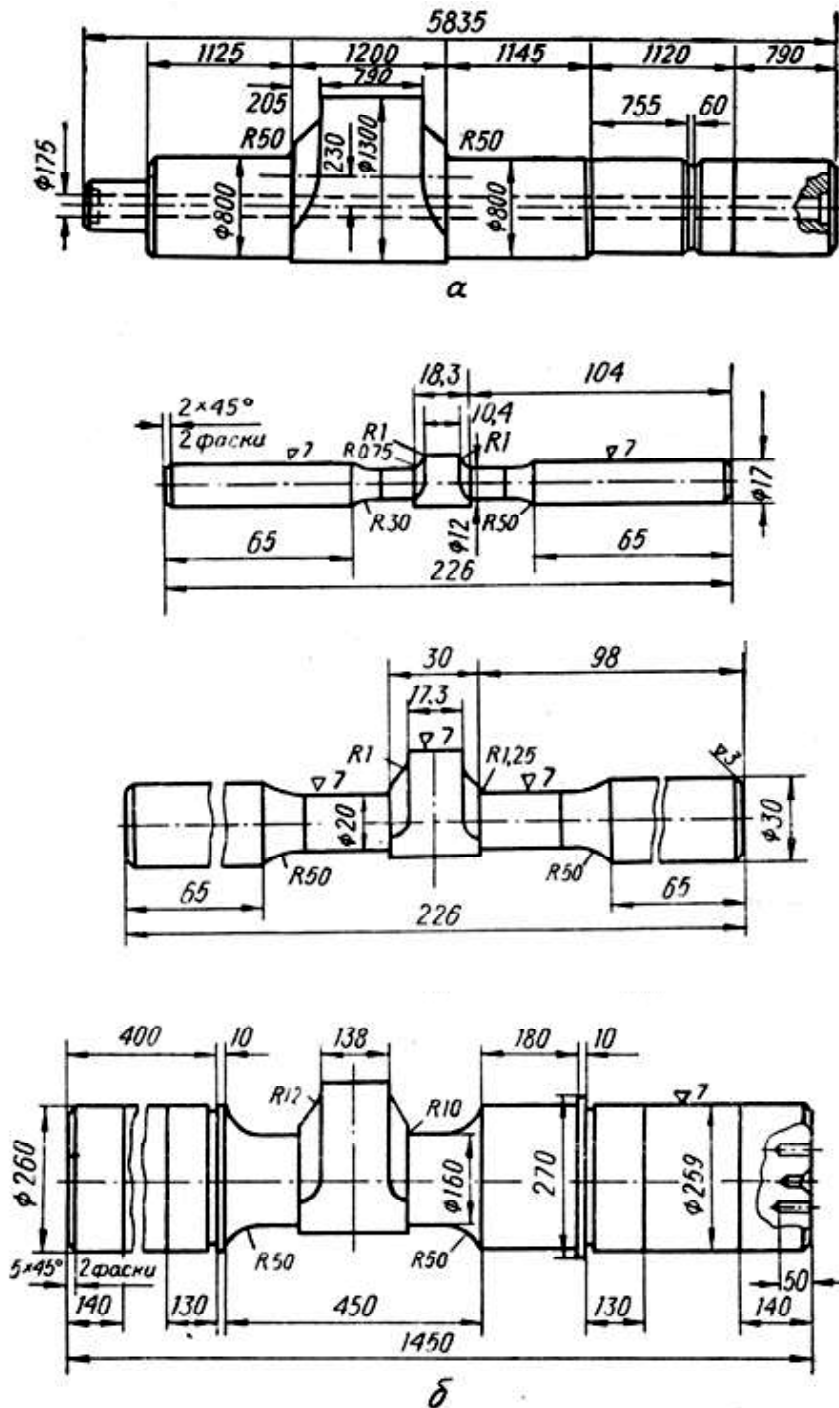


Рис. 1. Эксцентриковый вал горизонтально-ковочной машины (а) и его модели (б)

использованием стандартного оборудования.

Полученные результаты показали удовлетворительное совпадение напряженного состояния в сходственных точках малоразмерной лопатки и ее физически подобной модели.

Поэтому, предложено рассмотреть результаты работы [2] с учетом уже имеющегося опыта физического моделирования.

В работах [3–5] показано, что физические про-

цессы будут подобны при равенстве значений безразмерных комплексов (критериев подобия), составленных из заданных по условиям величин, описывающих данный процесс. Это единственное условие, необходимое (и достаточное) для подобия физических процессов.

Поэтому при изготовлении модели необходимо выдержать условия подобия (равенства величины безразмерных комплексов вала и его модели).

Таблица 1 – Величины критериев подобия для вала и его моделей

Критерий подобия	Объект исследования			
	Вал	Модели		
	Рабочий диаметр 800 мм	Рабочий диаметр 12 мм	Рабочий диаметр 20 мм	Рабочий диаметр 160 мм
$\pi_1 = \frac{\sigma_{-1} l^4}{EI}$	–	67,35	7,95	0,63
$\pi_2 = \frac{EI}{\gamma l^3 S}$	2488	26513	73432	45616
$\pi_3 = \frac{\sigma_b}{\sigma_T}$	1,33	1,33	1,33	1,33

В данном исследовании безразмерные комплексы получены с применением известного метода анализа размерностей [7] к обработке физических величин, характеризующих данный процесс.

Анализируя напряженное состояние эксцентрикового вала в условиях переменного кругового изгиба с постоянным по длине изгибающим моментом, выбран ряд физических величин, по мнению авторов, вносящих определенный вклад в описание данного процесса.

Кроме того, измерение выбранных физических величин можно производить с достаточной для практики точностью, не применяя специального оборудования, что дает определенное преимущество при разработке метода инженерного решения поставленной задачи.

Испытание моделей проведено при циклическом нагружении, поэтому в перечень параметров введены: жесткость ( $E I$ , где  $E$  – модуль упругости материала,  $I$  – момент инерции сечения модели в месте действия максимальных напряжений); удельный вес материала ( $\gamma$ ); длина рабочей части модели ( $l$ ); площадь сечения ( $S$ ) модели в месте действия максимальных напряжений.

Существенным фактором, влияющим на характеристики выносливости, является структура материала, обуславливающая его внутреннюю энергию (способность сопротивляться прилагаемой нагрузке). Считается, что зарождение микротрещины при циклическом нагружении происходит при наличии в локальном объеме конструкции пластической деформации [8, 9]. Поэтому в перечень параметров введены предел текучести  $\sigma_T$  и предел прочности  $\sigma_b$ , так как развитие микротрещины происходит с изменением параметров, определяющих структуру материала [9], в границах от предела текучести (появление микротрещины) до предела прочности (появление макротрещины) [10].

В перечень параметров введен предел выносливости ( $\sigma_{-1}$ ) при базовом числе циклов нагружения.

Физическую связь между выбранными величинами можно записать в неявном виде

$$F_1(\sigma_{-1}, EI, l, \gamma, S, \sigma_b, \sigma_T) = 0. \quad (1)$$

С использованием известного метода анализа размерностей [7] выражение (1) преобразуется в зависимость, содержащую безразмерные комплексы

$$F_2(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0, \quad (2)$$

где  $\pi_1 = \frac{\sigma_{-1} l^4}{EI}$  – комплекс напряженности – соотношение между внешней нагрузкой и внутренней упругой силой при деформации изгиба;

$\pi_2 = \frac{EI}{\gamma l^3 S}$  – комплекс динамического воздействия – соотношение между внутренней упругой силой и силой инерции при деформации изгиба;

$\pi_3 = \frac{\sigma_b}{\sigma_T}$  – энергетический комплекс – соотношение напряжений, определяющих зарождение и развитие трещины.

Используя полученные критерии подобия можно определить параметры модели, выносливость которой будет соответствовать выносливости вала в условиях кругового изгиба.

Результаты вычислений критериев подобия для вала и предложенных в [2] его моделей представлены в таблице 2. Как видно из таблицы, величины критериев всех предложенных моделей не равны между собой и критерию вала, что не соответствует положениям моделирования, показанным в [3–5].

Поэтому полученные результаты испытаний на выносливость, предложенных в [2] моделей не дают достоверной оценки выносливости вала.

С использованием критериев подобия можно вычислить геометрические параметры модели эксцентрикового вала для испытания на круговой изгиб.

Так, например, длины рабочей части моделей, имеющих диаметры рабочей части 12 мм, 20 мм, и 160 мм [2] (без изменения остальных параметров моделей), должны быть соответственно 210 мм, 296 мм, и 1180 мм.

### Обсуждение результатов

Представленные результаты свидетельствуют о решении поставленной в статье задачи — выполнен анализ результатов работ, проведенных в [2], в части выбора метода создания моделей для оценки предела выносливости вала, работающего в условиях переменного кругового изгиба с постоянным по длине вала изгибающим моментом, и рассмотрения результатов испытаний этих моделей.

Показано, что по результатам испытания геометрически подобных моделей оценивать напряженное состояние вала, работающего в условиях динамического нагружения, некорректно.

Показана возможность создания физически подобной модели для оценки напряженного состояния лопатки газотурбинного двигателя, которая является более сложной конструкцией чем вал. По результатам проведенных работ получены удовлетворительные результаты, что позволяет использовать данный метод для других видов конструкций.

Согласно предложенному методу показаны параметры физически подобной модели, по результатам испытаний которой можно оценить предел выносливости вала.

При оценке напряженного состояния реальной конструкции с помощью предложенного метода можно определять параметры создаваемой физически подобной модели, в комплексе учитывая условия заданного напряженного состояния конструкции, возможности имеющегося испытательного оборудования и изготовление модели из более дешевых (легкообрабатываемых) материалов.

### Выводы

Предложен метод определения параметров физически подобной модели эксцентрикового вала для оценки его предела выносливости при работе в условиях кругового изгиба с постоянным по длине вала изгибающим моментом.

При оценке напряженного состояния реальной конструкции, с помощью предложенного метода можно создать физически подобную модель, комплексно учитывающую как условия напряженного состояния реальной конструкции, так и имеющиеся ограничения испытательного оборудования.

### Список литературы

1. Масол В. А. Выносливость крупных валов с пресовой посадкой / Масол В. А., Кудрявцев И. В. — Вестник машиностроения, 1971. — № 9. — С. 37–42.
2. Выносливость валов из углеродистой и легированной сталей / [Белкин М. Я., Масол В. А., Саввина Н. М., Рулев В. И.] // Проблемы прочности. — 1977. — № 3. — С. 109–113.
3. Веников В. А. Теория подобия и моделирование / Веников В. А. — М. : Высшая школа, 1976. — 479 с.
4. Клайн С. Дж. Подобие и приближенные методы / С. Дж. Клайн. — М. : Мир, 1968. — 302 с.
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Седов Л. И. — М. : Наука, 1987. — 432 с.
6. Жеманюк П. Д. Исследование напряженного состояния лопаток турбомашин с привлечением метода моделирования / Жеманюк П. Д., Федоренко Б. Ф., Лукьянов В. С. // Вибрации в технике и технологиях. — 2001. — № 5. — С. 97–98.
7. Schenck Hilbert, Jr. Theories of engineering experimentation / Schenck Hilbert, Jr. — New York, St. Louis, San Francisco, Toronto, London, Sydney : McGraw — Hill book company. — 1968. — 380 p.
8. Ronay M. Fatigue of high-strength materials / Ronay M // Fracture and advanced treatise. — Vol. 3, Engineering fundamentals and environmental effects. — New York and London. Academic Press, 1971.
9. Yokobori Takeo. An interdisciplinary approach to fracture and strength of solids / Yokobori Takeo. — Groningen : Wolters — Noordhoff scientific publications L.T.D.
10. Федоренко Б. Ф. Оценка характеристик усталости рабочих лопаток компрессора вертолетного ГТД / Федоренко Б. Ф. // Материалы конференции по ГТД для вертолетов, легких самолетов и вспомогательных силовых установок. — Труды ЦИАМ № 1078, вып. 2, 1983. — С. 52–64.

Поступила в редакцию 06.06.2011

**Федоренко Б.Ф., Лук'янов В.С. До питання оцінки витривалості великогабаритних валів**

*В статті розглянута можливість оцінки витривалості валів з використанням методу фізичного моделювання. Пропоновані критерії подібності для будування моделі вала. Проаналізовані результати відомих випробувань геометрично подібних моделей горизонтально-кувальної машини й проповані розміри моделей, побудованих з урахуванням критеріїв подібності, які мають фізичний сенс. Критерії подібності отримані з використанням методу аналізу розмірностей.*

**Ключові слова:** тривалість, аналіз розмірностей, модель, фізичне моделювання.

**Fedorenko B., Lukjanov V. To a question of an estimation of endurance of large-sized shaft**

*In clause the opportunity of an estimation of endurance of shaft with use of a method of physical modelling is considered. Criteria of similarity for construction of model of a shaft are offered. Results of available tests of vectorially similar models of a shaft of horizontally-press machine are analysed and the sizes of models executed in view of the criteria of similarity having physical sense are offered. Criteria of similarity are received with use of a method of the analysis of dimensions.*

**Key words:** endurance, the analysis of dimensions, model, physical modelling.