

**ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ВИБРАЦИЮ.  
ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ**© 2012 И. Н. Овчинников<sup>1</sup>, В. А. Ермишкин<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения РАН, г. Москва

Рассматриваются возможности получения достоверных результатов испытаний на вибрацию за счёт применения новых средств измерений и методик испытаний, а также методы определения остаточного ресурса материала деформационной системой диагностики и фотометрической системой диагностики.

*Остаточный ресурс, усталость, долговечность, диагностика, деформация, датчик, лабораторные вибрационные испытания, фотометрия, изображение, спектр яркости.*

Условия эксплуатации многих объектов (самолётов, ракет, космических аппаратов, подводных лодок) и нарастающая нехватка металла во всём мире требуют уменьшения массы и материалоёмкости конструкций. Нахождение компромисса максимума надёжности при минимуме массы заложено в развитии методов адекватного определения поведения материалов в конструкции на заданные ресурс и надёжность. Этот сложный комплекс вопросов экспериментального и теоретического плана включает в себя: 1) определение поведения материала при известных нагрузках (его структурные и деформационные изменения); 2) выбор критериев, характеризующих поведение материала; 3) проведение испытаний в условиях, близких к эксплуатационным; 4) создание испытательного оборудования, воспроизводящего заданные условия и регистрирующего поведение материала; 5) использование математической статистики для объективной оценки результатов опыта; 6) развитие теории усталости; 7) создание методов диагностики усталостного разрушения и неразрушающего контроля; 8) создание методов прогнозирования остаточного ресурса, что необходимо для предотвращения аварий, подготовки замены изделий при эксплуатации. Качество изделий напрямую зависит от уровня лабораторных вибрационных испытаний (ЛВИ), которые являются способом контроля долговечности и надёжности. ЛВИ имеют две основные проблемы:

1. Получение достоверных усталостных характеристик материала при нагрузках,

близких к эксплуатационным, исследование виброн нагруженности конструкции и прогнозирование долговечности объекта испытаний в условиях эксплуатации.

2. Оценка надёжности и вибропрочности объекта испытаний за заданное время при заданных нагрузках. При этом по завершении испытаний пока нет достоверных сведений об оставшемся ресурсе объекта, а доводить конструкцию до разрушения слишком дорого.

ЛВИ конструкций проводятся по различным методикам: а) для определения надёжности работы объекта за заданное время - испытания на виброн нагруженность (контрольный параметр – виброскорость или виброускорение); б) для определения вибропрочности (долговечности) объекта (контрольный параметр – напряжение в материале). Общая тенденция – имитация широкополосной случайной вибрации (ШСВ) как наиболее распространённого эксплуатационного виброн нагружения.

МЭК - Международная электротехническая комиссия предъявляет к виброиспытаниям два основных требования: достоверность результатов и их воспроизводимость в различных лабораториях, которая особенно важна при проведении приёмо-сдаточных испытаний. Воспроизводимость результатов испытаний нереальна при низкой достоверности результатов. С позиций метрологии показатели достоверности результатов контроля испытаний определяются с учётом показателей точности испытаний, априорных данных об испытаниях, характеризующих

распределение возможных значений контролируемого параметра. При высокой степени достоверности результатов испытаний по ним можно получить подтверждение известных законов механики, выявить новые закономерности и свойства либо получить возможность исследовать актуальные задачи новым методом. Установить достоверность результатов виброиспытаний можно по результатам усталостных испытаний на тех же режимах, т.к. надёжным критерием выбора режима нагружения является пока только время до разрушения образца. Однако для построения одной кривой усталости необходимо порядка 60 тысяч часов испытаний.

На примере анализа результатов большой серии усталостных испытаний, удовлетворяющих метрологическим требованиям и

проведенным с использованием ряда новых систем, рассмотрим перспективы использования этих результатов.

### Ёмкостной датчик деформаций

В исследованиях деформация измерялась ёмкостным датчиком, который, в отличие от тензорезистора, не деформируется вместе с объектом испытаний и не меняет свои метрологические характеристики в процессе длительного нагружения [1]. Датчик измеряет деформации бесконтактным способом, что позволяет ему сохранять неизменными свои характеристики вплоть до разрушения образца (рис. 1).

Конструктивно датчик состоит из опорной пластинки 1, испытуемого образца 3, слоя диэлектрика между ними 2 и измерительного модуля.

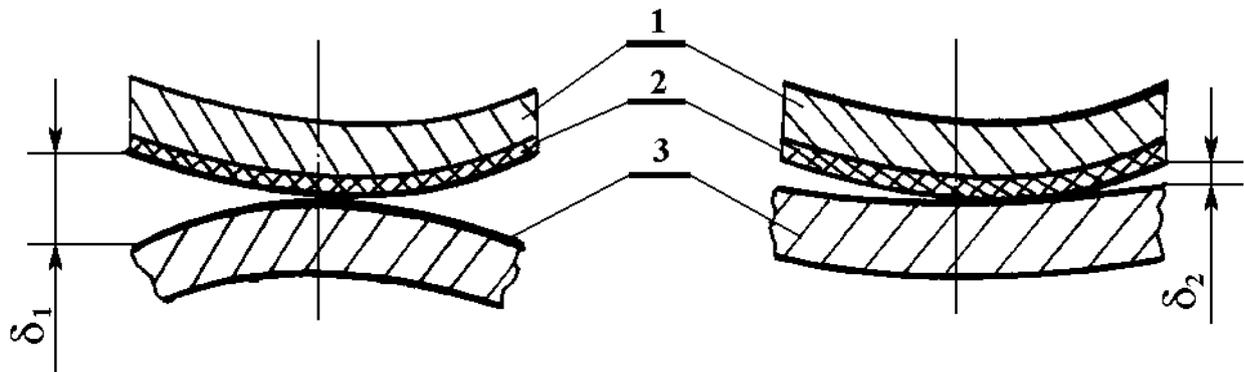


Рис.1. Ёмкостной датчик деформаций для плоских и цилиндрических поверхностей

При испытаниях консольно закреплённых на вибростенде образцов из сплава АМгб по методике [2], не проводящей никаких схематизаций случайных процессов, предписывающей измерять все параметры вплоть до разрушения образца и содержащей требования к испытаниям на вибропрочность и на виброн нагруженность, использовались моно- и полигармонические резонансные режимы, узкополосные и широкополосные случайные режимы со сплошным, постепенно расширяющимся спектром (рис. 2).

Получены 10 кривых усталости (рис. 3) и 10 «кривых виброн нагруженности» (рис. 4) - зависимостей времени до разрушения образца  $t_p$  от величины средней виброскорости  $v_{ср}$ . Эти кривые обратны по расположению кривым усталости (сверху располагаются кривые усталости для гармонических режимов,

ниже – случайных режимов, кривые виброн нагруженности гармонических режимов лежат ниже кривых случайных режимов) и позволяют сравнивать виброн нагруженность объектов на различных режимах.

Впервые в практике испытаний получены кривые усталости для моно- и полигармонических режимов при постоянной деформации (режимы № 9 и 10), заметно отличающиеся от стандартных. Анализ результатов испытаний позволил решить ряд новых проблем.

**1. Оценка степени опасности режимов виброн нагружения.** Наиболее опасный режим - узкополосный случайный режим со спектром в области резонансных частот, далее идут ШСВ, полигармонический и моногармонический режимы.

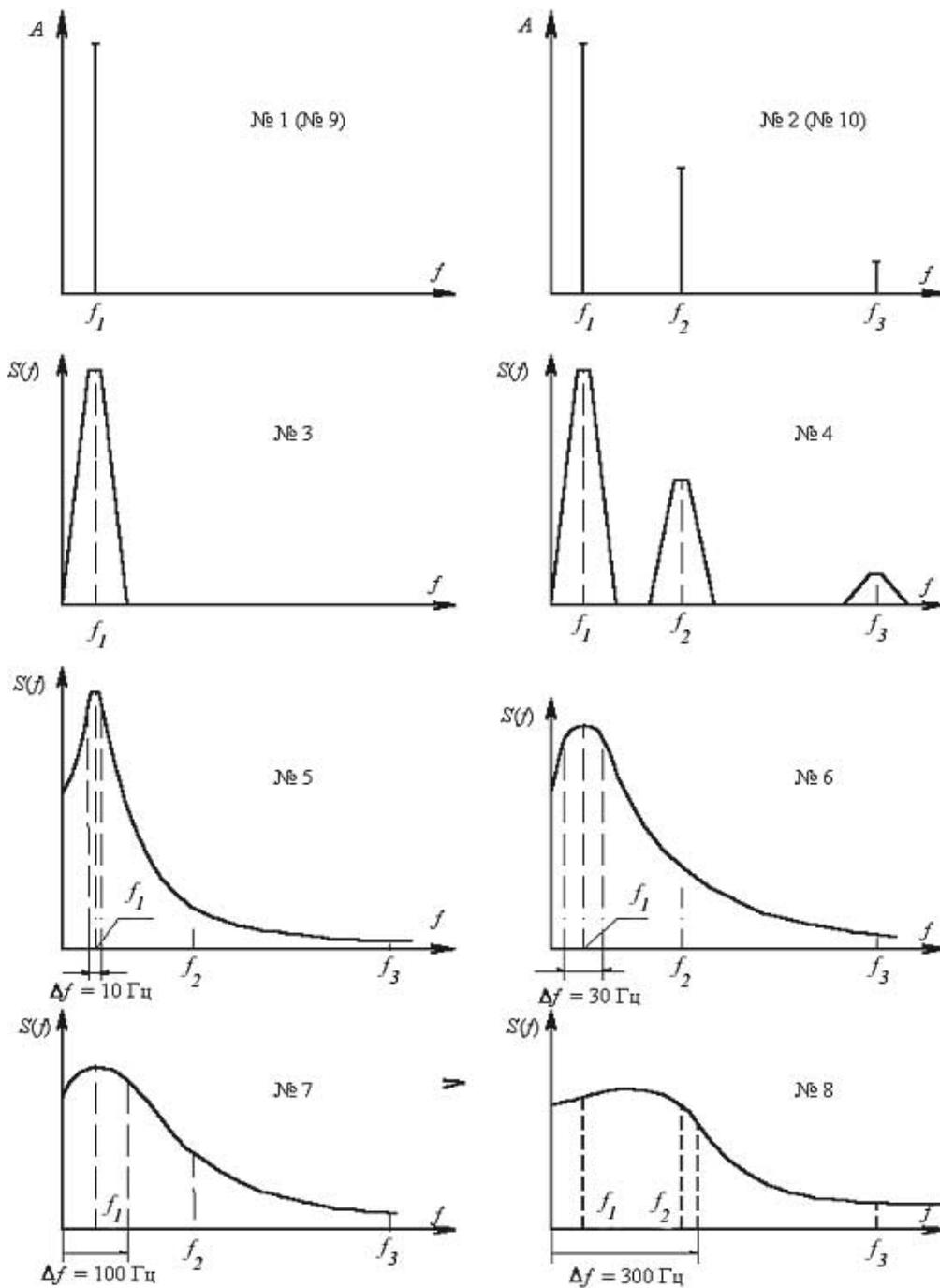


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры испытательных режимов:  $A$  – амплитуда спектра вибровоздействия;  $f_1, f_2, f_3$  – собственные частоты испытываемых образцов;  $S(f)$  – спектральная плотность мощности вибровоздействия;  $\Delta f$  – ширина спектра формирующих режимы фильтров

**2. Отсутствие постоянного коэффициента «эквивалентности» случайных и гармонических режимов.** Кривые усталости располагаются эквидистантно, с различной кривизной, что требует определения коэффициента «эквивалентности» для каждого уровня нагружения.

**3. Определение тяжелейшего режима в классе ШСВ.** В эксперименте и моделировании получены экстремумы среднего напряжения  $\sigma_{cp}$  (рис. 5) и средней виброскорости  $v_{cp}$  (рис. 6) объекта испытаний при расширении спектра нагружения.

Положение экстремума при случайном вибровоздействии (как и резонанса при гармоническом) определяется параметрами объекта и поэтому «захват» спектром нагружения каждой последующей частоты его собственных колебаний приводит к появлению очередного экстремума параметров объекта, в том числе и минимума.

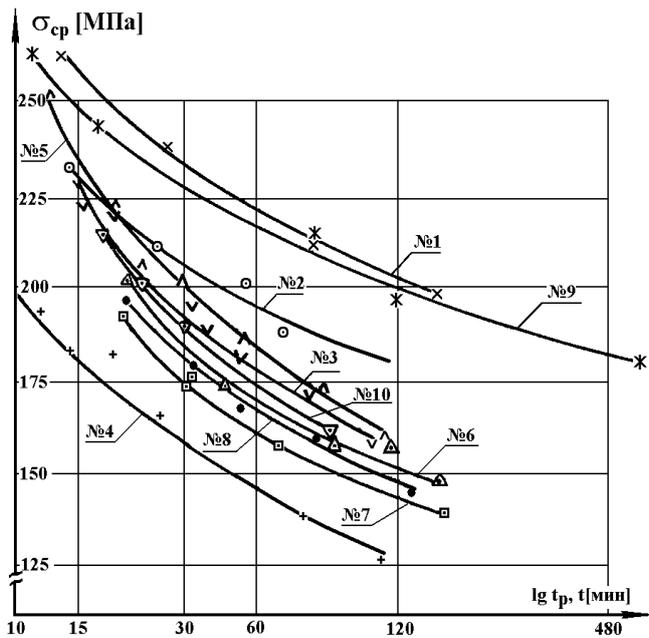


Рис. 3. Кривые усталости

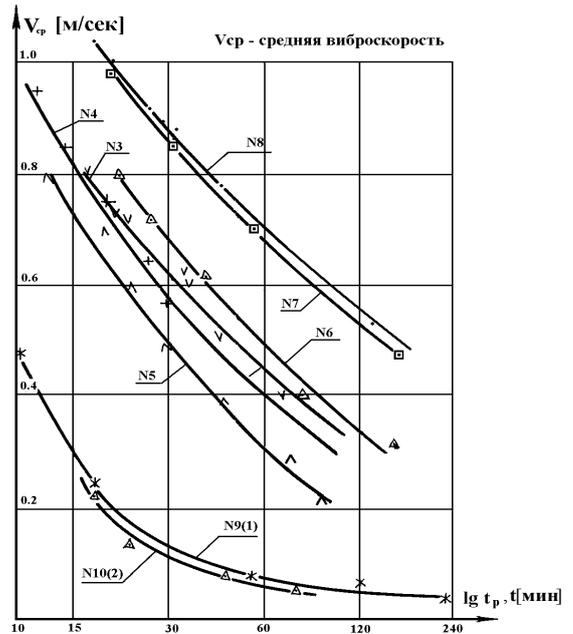


Рис. 4. Кривые виброн нагруженности

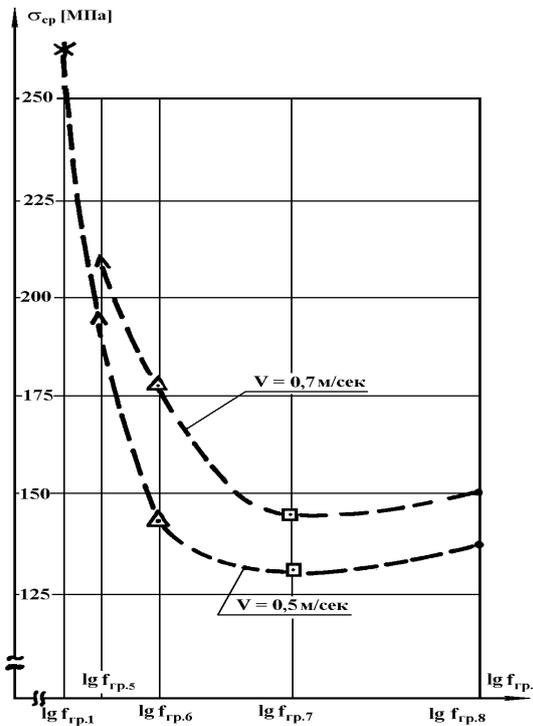


Рис. 5. Зависимость  $\sigma_{cp}$  от  $\Delta f$  при постоянной  $v_{cp}$

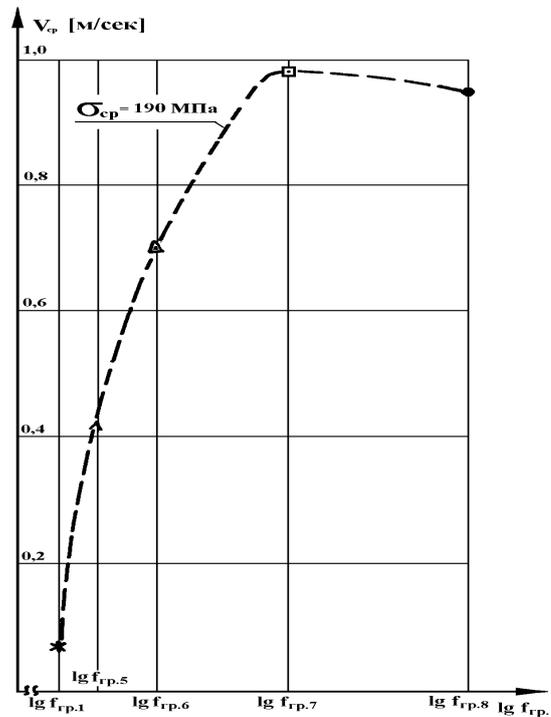


Рис. 6. Зависимость  $v_{cp}$  от  $\Delta f$  при постоянном  $\sigma_{cp}$

Существование тяжелейшего режима в классе ШСВ даёт возможность решить проблемы воспроизводимости результатов испытаний и ускоренных испытаний. Внедряемые в настоящее время в нашей стране стандарты серии ISO не позволяют добиться необходимой воспроизводимости результатов испытаний.

**4. Аналитическое описание кривых усталости.** Выбор координат позволил представить кривые усталости в виде пучка параллельных прямых и даже одной прямой

для всех режимов испытаний (рис.7, 8).

Можно прогнозировать результаты по данным ограниченной серии испытанных образцов [3].

Здесь использовано критическое напряжение  $\sigma_k$  [4], при котором считалось, что длина усталостной трещины достигла размеров зерна металла.

Величина «А» является числовым коэффициентом, характеризующим материал и режим нагружения. Этот новый способ представления кривых усталости описан в [3].

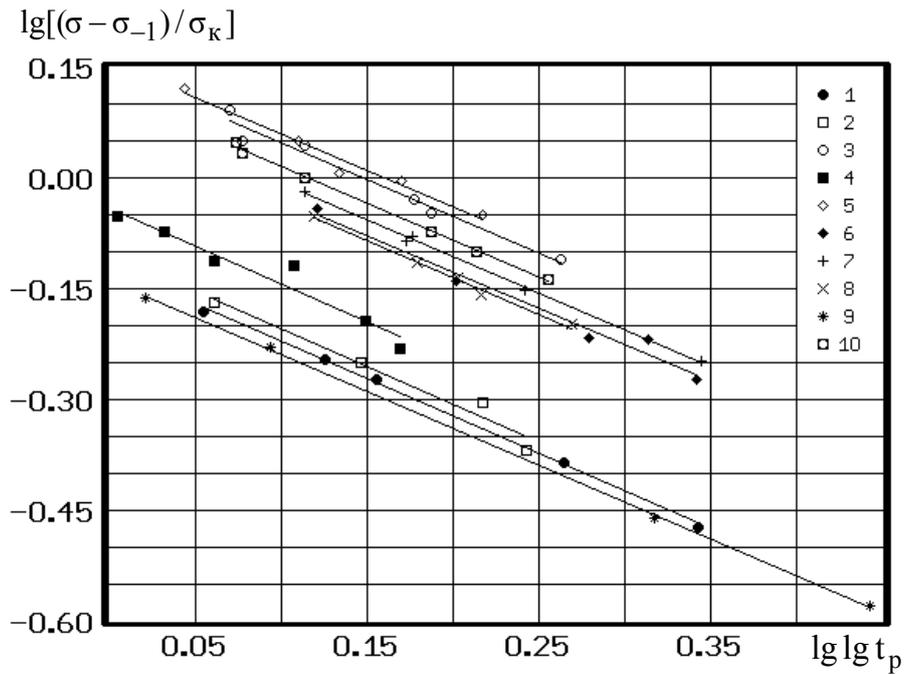


Рис. 7. Результаты усталостных испытаний, «нормированные» на величину критического напряжения  $\sigma_K$

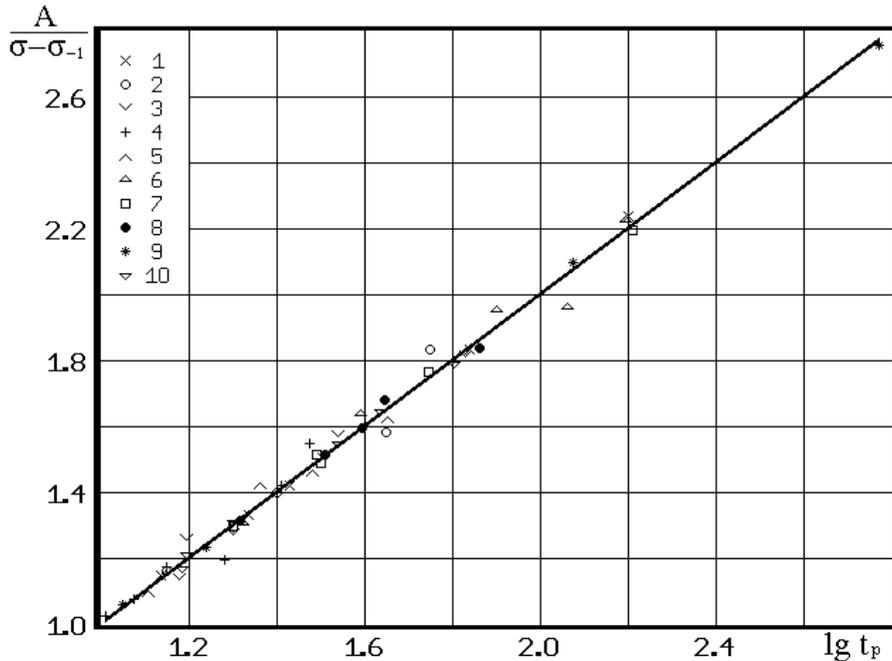


Рис. 8. Результаты усталостных испытаний, «нормированные» на величину предела усталости материала

**5. Термоактивационный анализ результатов испытаний.** Практика инженерных расчётов деталей машин базируется, главным образом, на расчётах в статическом приближении.

Единственным исключением можно считать кинетическую теорию прочности [5], в которой под разрушением как в статике, так и при циклическом нагружении понимается кинетический процесс накопления в материале структурных повреждений, из которых с течением времени формируется магистральная трещина, приводящая к разделению тела на части. Определяющее соот-

ношение, связывающее термоактивационные характеристики повреждаемости материала ( $U_0$  - энергия активации процесса повреждаемости,  $\gamma$  -  $\gamma$  - эффективный активационный объём процесса); параметры режима испытаний ( $T$  - температура по шкале Кельвина,  $\sigma$  - действующее в образце напряжение), физические параметры процесса ( $R$  - универсальная газовая постоянная,  $t_0$  - характеристическое время процесса повреждаемости) и функцию структурного состояния материала  $t_p$ , которая имеет смысл долговечности, представлено формулой:

$$t_p = t_o \times \exp \{ (U_o - \gamma\sigma) / RT \}.$$

Получено соотношение для описания процесса усталостного разрушения, включающее в явном виде условия испытаний, характеристики материала и время до разрушения образцов [6].

**6. Деформационная (изменение деформации при постоянной виброскорости) и виброскоростная (изменение виброскорости при постоянной деформации) характеристики усталостного разруше-**

**ния.** Характеристики (рис. 10 и 11) имеют экстремумы после истощения 75% и 95% ресурса соответственно, благодаря чему можно диагностировать наступление усталостного разрушения. На базе этих результатов может быть построена деформационная (параметрическая) система диагностики усталостного разрушения, основанная на измерении в эксплуатации деформации и виброскорости элементов конструкции и сравнении их со значениями, хранящимися в памяти системы [7].

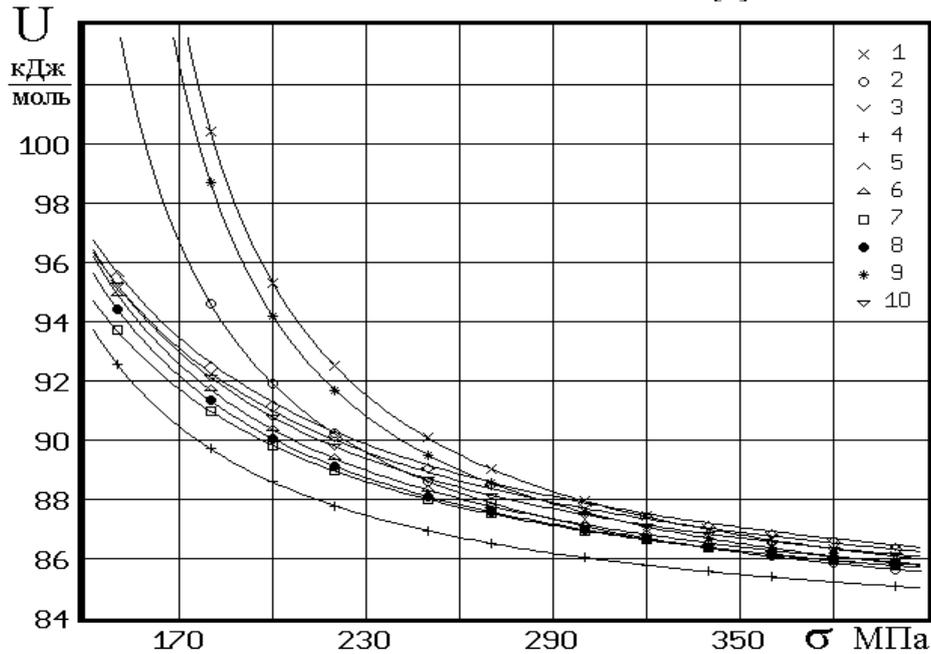


Рис. 9. Зависимость эффективной энергии активации усталостного разрушения от среднего напряжения в образце

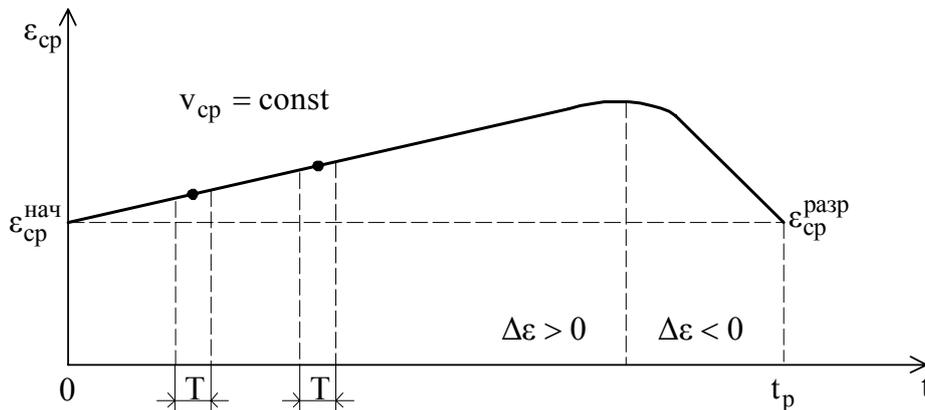


Рис. 10. Изменение во времени средней деформации в опасном сечении образца при постоянном среднем значении виброскорости

**7. Фотометрическая диагностика усталостной повреждаемости материала.** В процессе истощения ресурса долговечности увеличивается шероховатость поверхности материала и уменьшается её способность от-

ражать белый свет. Количественное измерение отражающей способности (яркости) структуры поверхности объекта проводится обработкой на компьютере цифрового фотоизображения поверхности.

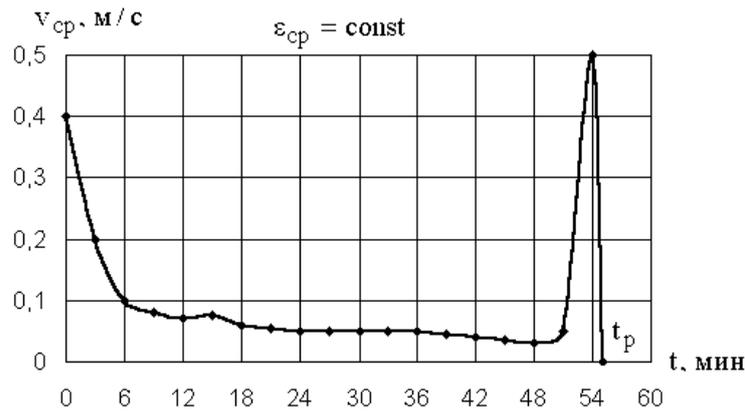


Рис. 11. Изменение во времени средней виброскорости в опасном сечении образца при постоянном среднем значении деформации

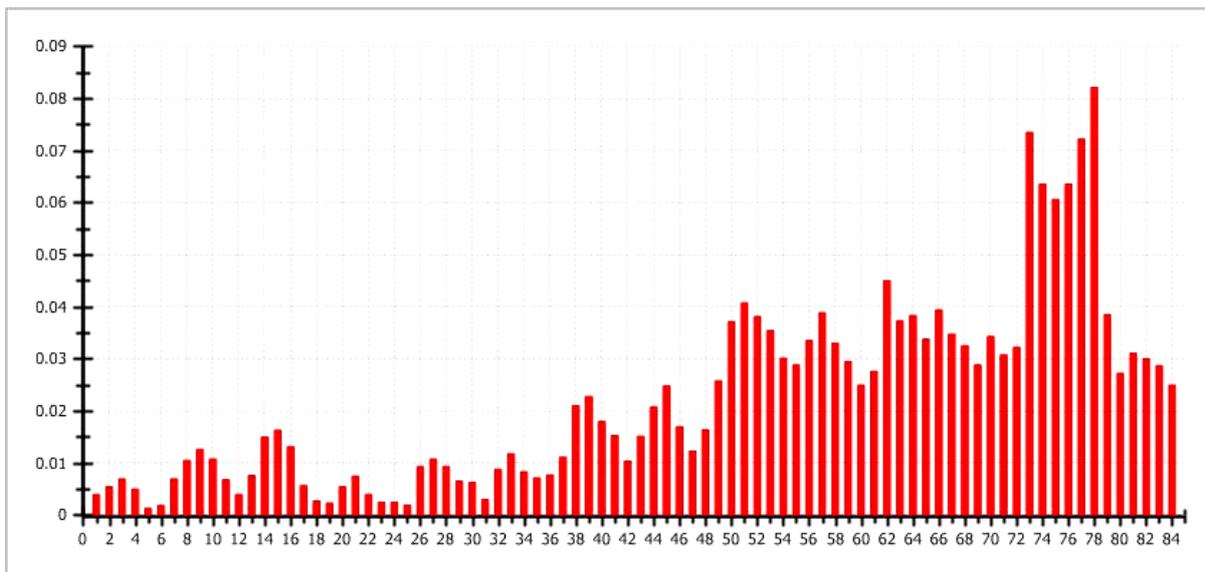


Рис. 12. Гистограмма яркости образца после приложения нагрузки

Впервые получен градуировочный график, переводящий количественные значения структурных характеристик поверхности в значения амплитуды напряжений и усталостной повреждаемости. Во время обработки изображение поверхности образца разбивалось по длине на фрагменты, каждый из которых обрабатывался как отдельное изображение (образец). Использование такой системы позволяет сократить затраты на испытания в 10-12 раз. В результате компьютерных исследований были надёжно установлены следующие факты [8]:

а) Спектры яркости фрагментов обработанных образцов до нагружения представляют собой симметричные колоколообразные кривые распределения, близкие к нормальному.

б) В процессе усталостных испытаний распределение спектра яркости фрагмента образца деформируется, приближаясь к нормально-логарифмическому распределению.

в) Статистические моменты распределе-

ния спектров яркости обнаружили степень корреляции с амплитудным значением напряжений, приложенных к образцу, выше 0.95.

В эксплуатации изделий деформационная система диагностики должна функционировать стационарно, а фотометрическая система – при периодическом контроле.

### Библиографический список

1. Овчинников, И.Н. Ёмкостной датчик для измерения изгибных деформаций [Текст] / И.Н. Овчинников // Приборы и системы управления. – 1995. – №3. – С. 25.
2. Овчинников, И.Н. Методика испытаний при сложном вибрационном нагружении [Текст] / И.Н. Овчинников // Заводская лаборатория. – 1986. - №10. – С. 69-74.
3. Овчинников, И.Н. Аналитическое описание кривых усталости [Текст] / И.Н. Овчинников, В.А. Ермишкин // Проблемы механики современных машин: материалы Третьей междунар. конф. – Улан-Удэ: Вос-

точно-Сибирский гос. технол. ун-т, 2006. - Т. 1. – С. 183-187.

4. Иванова, В.С. Усталость металлов [Текст] / В.С. Иванова. - М.: Металлургиздат, 1963. – 258 с.

5. Ермишкин, В.А. Применение термоактивационного анализа для прогнозирования кривой усталости [Текст] / В.А. Ермишкин, И.Н. Овчинников // Междунар. конф. «Энергодиагностика и Condition Monitoring»: сб. тр. – М.: ИРЦ Газпром, 1999. – Т.4. – Ч.2. – С. 84-97.

6. Ермишкин, В.А. Оценка опасности режимов циклического нагружения для усталостной повреждаемости материалов [Текст] / В.А. Ермишкин, И.Н. Овчинников // Труды междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные

проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин». – Самара, 2003. – С. 414-421.

7. А.с. №1303887 Способ определения степени усталостного разрушения материала при знакопеременном циклическом нагружении [Текст] / И.Н. Овчинников. от 31.10.85//Б.И.–1987, №14.

8. Фотометрическая диагностика усталостного разрушения металлических материалов [Текст] / В.А. Ермишкин, Д.П. Мурат, Ю.Д. Лепёшкин [и др.] // Сб. статей по материалам Второй междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. – М., 2007. - С. 605.

## **AUTHENTICITY OF THE VIBRATION TESTS. DIAGNOSIS AND PREDICTION OF FATIGUE FAILURE**

© 2012 I. N. Ovchinnikov<sup>1</sup>, V. A. Ermishkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical State University

<sup>2</sup> Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow

The issues compiling numerical computational model on the method of finite volumes are discussed in this paper. This model is used to measure axial acting on the rotor of auger-centrifugal stage of combined fuel pump. Model verified by comparing the calculated and experimental characteristics of the discharge. The paper discusses the impact of some design parameters auger-centrifugal stage on the value of the axial force.

### **Информация об авторах**

**Овчинников Игорь Николаевич**, доктор технических наук, профессор, руководитель лаборатории виброиспытаний, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). E-mail: [iovc-hin@mx.bmstu.ru](mailto:iovchinn@mx.bmstu.ru). Область научных интересов: теория колебаний, вибрационные испытания, остаточный ресурс.

**Ермишкин Вячеслав Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения РАН, г. Москва. E-mail: [eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru). Область научных интересов: испытания материалов, физика металлов, остаточный ресурс.

**Ovchinnikov Igor Nikolaevich**, Doctor of Sciences., director of vibration testing laboratory, Bauman Moscow State Technical University (National Research University). E-mail: [iovc-hin@mx.bmstu.ru](mailto:iovchinn@mx.bmstu.ru). Area of research: theory of vibration, vibration tests, the residual resource.

**Ermishkin Vyacheslav Alexandrovich**, Doctor of Sciences, leading researcher, Institute of Metallurgy and Material Science of Russian Academy of Sciences. E-mail: [eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru). Area of research: materials testing, physics of metals, residual resource.