



## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

С. А. БЕЖЕНОВ

*Исследована взаимосвязь механических и акустоэмиссионных характеристик лопаток компрессора из сплава титана. Установлено, что их долговечность определяется локальным напряженным состоянием материала, связанным с параметрами АЭ при фиксированном напряжении, а также его жесткостью, определяемой особенностями АЭ характеристики. Предложена методика прогнозирования долговечности лопаток на заданном уровне напряжений неразрушающим методом АЭ.*

*Interrelation of the mechanical and acoustoemission characteristics of titanium alloy compressor blades is studied. It is found that their fatigue life is determined by the local stressed state of material, associated with AE parameters at a fixed stress, as well as its rigidity, determined by the features of AE characteristic. A procedure is proposed for forecasting the fatigue life of blades at a specified level of stresses by the non-destructive AE method.*

Основной задачей конструктора является создание конкурентоспособного изделия, выполняющего предназначенные ему функции в течение заданного срока. Ее успешное решение возможно при умении оценить техническое состояние элементов изделия (на любом этапе производства и эксплуатации) и предвидеть возможность его разрушения. Обычно при проектировании конструкции стремятся не допустить предельных состояний ее элементов. Однако практика изготовления и эксплуатации машин показывает, что детали, изготовленные по единой технологии, имеют большой разброс механических свойств, особенно долговечности. Поскольку ресурс изделия определяется минимальной долговечностью входящих в него деталей, актуальной является разработка простых и надежных методов НК технического состояния каждой конкретной детали. Одним из эффективных методов такого контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), который основан на регистрации излучаемых материалом механических волн, вызванных внутренней динамической локальной перестройкой структуры материала, определяющей его механические свойства.

В работах [1, 2] показано, что в процессе деформирования вязких материалов интенсивность потока сигналов АЭ изменяется по выпуклой кривой Гаусса, особенности которой характеризуют механические свойства материала. В статьях [3, 4] описан разработанный метод ее коррекции, исключая искажение сигналов АЭ при высокой интенсивности потока актов АЭ, что существенно повышает точность и достоверность результатов АЭ контроля и позволяет более достоверно изучать кинетику деформации и разрушения материала. В работах [5–8] приводятся результаты исследования зависимости характеристик сопротивления усталости от параметров АЭ при неоднородном напряженном состоянии материала деталей машин, а также методики их АЭ диагностики. Таким образом, данные проведенных исследований свидетельствуют о высокой информативности и эффективности метода АЭ при разработке методов НК технического состояния материала деталей и прогнозирования их долговечности.

В данной статье на примере лопаток компрессора из сплава титана мартенситного класса ВТ8 с различной технологической наследственностью исследуется взаимосвязь механических характеристик с параметрами АЭ с целью доработки методики прогнозирования долговечности деталей машин этим неразрушающим методом.

**Материалы и методики исследований.** Исследовали три партии лопаток компрессора из жаропрочного двухфазного  $\alpha + \beta$ -сплава титана (Ti–Al–Mo–Si) мартенситного класса с различной технологической наследственностью: изготовленные по серийной технологии; с поверхностями, подвергнутыми низкотемпературному цианированию (НТЦ); изготовленные по серийной технологии с последующим НТЦ, у которых на входной кромке были выполнены надрезы треугольного профиля глубиной 0,5 мм, имитирующие забоину. Химико-термическая обработка заключалась в выдержке лопаток в течение 3 ч при температуре 560 °С в расплаве солей NaCNO–KCl–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Акустоэмиссионный контроль лопаток заключался в регист-

рации скорости счета сигналов АЭ  $\dot{N}_{АЭ}$  на приборе АФ-15 при ступенчатом повышении амплитуды средних напряжений цикла  $\sigma_a$  с шагом  $\Delta\sigma_a = 50$  МПа до уровня, соответствующего значению  $\sigma_a = 0,9\sigma_{-1}$ . Усталостные испытания проводились на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400

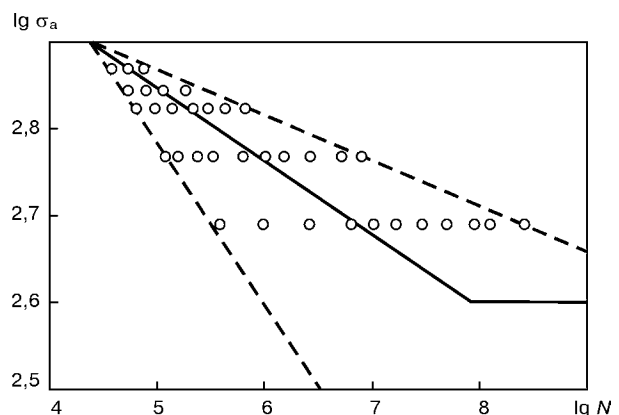


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний лопаток компрессора из сплава ВТ8

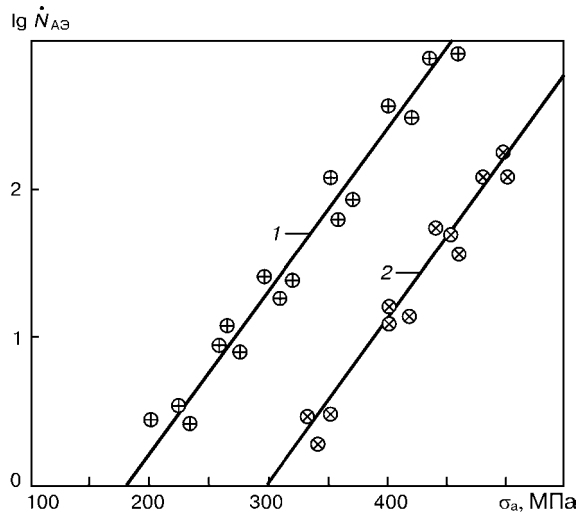


Рис. 2. Зависимости скорости счета сигналов АЭ от номинальных циклических напряжений в лопатках компрессора из сплава ВТ8, имеющих минимальную (1) и максимальную (2) долговечность

при действии циклических напряжений в консолюно закрепленных лопатках.

**Результаты испытаний и их обсуждение.** На рис. 1 представлена полная диаграмма усталости генеральной выборки лопаток компрессора из сплава титана с разной технологической наследственностью. Она характеризуется большим разбросом значений долговечности, увеличивающимся с уменьшением амплитуды приложенного напряжения. Обычно все поле разброса данных усталостной долговечности при разных амплитудах напряжений испытываемого объекта рассматривают с позиций математической статистики как семейство кривых, характерным параметром которых служит величина вероятности разрушения, — так называемые кривые усталости равной вероятности разрушения [9, 10]. В результате проведенных ранее исследований [11] установлено, что в подавляющем большинстве случаев для участка левой ветви кривой усталости при напряжениях, не превышающих предел текучести, между  $\lg \sigma_a$  и  $\lg N$  наблюдается линейная зависимость. Это позволяет представить ее в виде уравнения

$$\sigma_a^m N = C = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\sigma_a$  — амплитуда циклических напряжений, Па;  $N$  — количество циклов до разрушения;  $m$  — показатель степени;  $C$  — постоянная.

Исходя из физической природы разброса значений долговечности, полную диаграмму усталостного разрушения исследуемых деталей можно рассматривать как семейство диаграмм усталости деталей, имеющих одинаковое техническое состояние. Иными словами, каждой конкретной детали соответствует определенная кривая усталости, описываемая уравнением (1), где показатель степени  $m$  и коэффициент  $C$  определяются опытным путем. При таком подходе случайными будут свойства конкретной детали, а ее долговечность уже становится величиной детерминированной, обусловленной предысторией детали. Тогда левая часть уравнения (1) представляет собой уровень энергетического воздействия на испытываемую деталь, а коэффициент  $C$  — уровень ее сопротивления усталости. Разрушение наступает при равенстве этих параметров. Поскольку усталостная прочность — это свойство конкретного изделия, обусловленное его техническим состоянием, то коэффициенты  $C$  и  $m$  для конкретного изделия неизменны на каждом уровне напряжений и, очевидно, связаны с параметрами АЭ при его нагружении. Такой подход позволяет реализовать неразрушающий метод определения долговечности конкретной детали по параметрам АЭ на заданном уровне напряжений, для чего достаточно установить связь параметров АЭ с уровнем напряжений в материале детали и с ее долговечностью. Прямые линии, проведенные через точки, соответствующие максимальным и минимальным значениям долговечности при разных уровнях напряжений (рис. 1), сходятся в одной точке (полюсе диаграммы) и описываются уравнением (1). С позиции принятого подхода все диаграммы усталости выборок деталей с одинаковой усталостной прочностью также должны выходить из этого полюса и образовывать с осью ординат некоторый угол, определяемый техническим состоянием деталей. Задача построения таких диаграмм усталости решалась путем установления взаимосвязи механических характеристик материала деталей со скоростью счета сигналов АЭ при соответствующих условиях их нагружения.

На рис. 2 показаны зависимости скорости счета АЭ  $\dot{N}_{АЭ}$  от уровня номинального напряжения  $\sigma_a$  для двух групп лопаток, имеющих соответственно максимальную и минимальную долговечность на одинаковом эквивалентном уровне приложенного циклического напряжения  $\sigma_a = 1,2\sigma_{-1}$ . При напряжениях, не превышающих предел усталости  $\sigma_{-1}$ , зависимости  $\lg \dot{N}_{АЭ} = f(\sigma_a)$  представляют собой параллельные прямые, причем лопатки с более высоким уровнем АЭ при одинаковом уровне напряжения имеют меньшую долговечность. Из этого следует, что интенсивность потока АЭ в материале лопатки при фиксированном уровне напряжения, характеризуя интенсивность деформационных про-

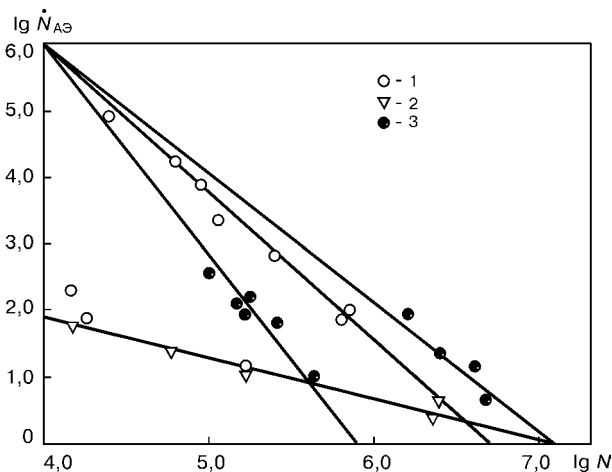


Рис. 3. Регрессионные зависимости скорости счета АЭ от долговечности лопаток компрессора из сплава ВТ8: 1 — изготовленные по серийной технологии; 2 — с надрезом; 3 — после НТЦ



цессов в материале, обуславливает усталостную прочность детали, в частности, ее долговечность сигналов на определенном уровне напряжений.

На рис. 3 приведены графики зависимости скорости счета сигналов АЭ  $\dot{N}_{АЭ}$  при фиксированном напряжении  $\sigma_a = 0,6\sigma_{-1}$  от долговечности лопаток  $N$  при фиксированном напряжении  $\sigma_a = 1,2\sigma_{-1}$ . Видно, что экспериментальные точки, соответствующие лопаткам без надреза с разной технологической наследственностью, хорошо укладываются на разные прямые, исходящие из одной точки — полюса, причем для лопаток после НТЦ точки располагаются на разных прямых. Следовательно, для лопаток без надреза аналогично зависимости  $\lg \sigma_a = f(\lg N)$  справедливо уравнение

$$N\dot{N}_{АЭ}^m = C, \quad (2)$$

где  $N$  — долговечность лопатки на соответствующем уровне напряжения;  $\dot{N}_{АЭ}$  — скорость счета сигналов АЭ в материале лопатки при фиксированном уровне его напряжения, одинаковом для всех лопаток генеральной выборки;  $C$  — постоянная, характеризующая усталостную прочность конкретной детали;  $m$  — показатель степени диаграммы усталости этой детали.

Расположение экспериментальных точек на разных прямых свидетельствует о действии разных механизмов усталостного разрушения. Согласно структурно-энергетической теории [12] разрушение материала происходит после преодоления определенного энергетического барьера, уровень которого определяется жесткостью его локального напряженного состояния. При этом переход от одного энергетического уровня к другому определяется законом дискретности параметров разрушения

$$z = \Delta^{1/n} = \mu, \quad (3)$$

где  $z$  — отношение параметров, характеризующих энергетический уровень разрушения материала;  $\Delta$  — универсальная постоянная металла (для титана  $\Delta = 0,104$  при  $T = 300$  К [12]);  $n$  — число геометрической прогрессии со знаменателем 2;  $\mu$  — коэффициент жесткости напряженного состояния материала, определяющий энергетический барьер разрушения последнего.

В уравнении (2) коэффициент  $C$  характеризует энергетический уровень разрушения материала с определенной жесткостью его напряженного состояния и представляет собой долговечность лопаток при  $\lg \dot{N}_{АЭ} = 0$ . Тогда согласно уравнению (3)

$$\lg C_{i-1} / \lg C_i = \Delta^{1/n_i}, \quad (4)$$

где значения  $\lg C_i = \lg N_i$  при  $\lg \dot{N}_{АЭi} = 0$  определяются из зависимостей на рис. 3.

На рис. 3 показаны расчетные прямые уравнения (4) при  $n_1 = 32$  и  $n_2 = 64$ , на которые достаточно хорошо укладываются экспериментальные точки

для лопаток без надреза, что согласуется с законом дискретности параметров разрушения.

Разная жесткость напряженного состояния материала лопаток после НТЦ, очевидно, обусловлена действием разных механизмов усталостного разрушения. При НТЦ происходит насыщение поверхностного слоя материала одновременно углеродом и азотом, причем азотом поверхность насыщается в большей степени, чем углеродом. При этом усталостные характеристики сплава изменяются за счет, во-первых, усадочных напряжений, возникающих при действии высоких градиентов температур; во-вторых, соединения азота и углерода с другими элементами и связанного с этим объемного расширения материала, вызывающего возникновение остаточных напряжений; в-третьих, образования твердых нитридов и карбидов в поверхностном слое материала.

При неоднородном напряженном состоянии материала в процессе его нагружения действуют изменяющиеся по глубине внутренние остаточные  $\sigma_o$  и растягивающие напряжения от внешней нагрузки  $\sigma_p$ . Поэтому механизм распространения трещины, существенно влияющий на долговечность детали, определяется суммарным напряжением  $\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_o + \vec{\sigma}_p$ , зависящим от соотношения градиентов рассмотренных напряжений. Если имеют место сжимающие остаточные напряжения, но  $|\text{grad } \sigma_p| > |\text{grad } \sigma_o|$ , то трещина, зарождаясь на некоторой глубине поверхностного слоя, распространяется к поверхности с увеличивающейся скоростью, так как размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  при росте трещины в этом направлении растет. Толщину поверхностного слоя трещина при этом проходит достаточно быстро. Если же при сжимающих остаточных напряжениях  $|\text{grad } \sigma_p| < |\text{grad } \sigma_o|$ , то скорость роста трещины к поверхности уменьшается, так как размах  $\Delta K$  при этом уменьшается. Времени для прохождения трещины такого упроченного слоя требуется больше, а долговечность такой детали выше.

При каждом механизме разрушения разный уровень пластически деформированных микрообъемов обуславливает разную скорость процесса усталостного разрушения. Поскольку метод АЭ основан на регистрации излучаемых материалом механических волн, вызванных внутренней локальной динамической перестройкой структуры твердого тела, то скорость счета сигналов АЭ пропорциональна объему пластически деформированного материала. Это объясняет связь интенсивности потока АЭ при фиксированном напряжении с долговечностью детали на определенном уровне напряжений.

Специфика долговечности лопаток с надрезом состоит в том, что под действием растягивающих напряжений от внешней нагрузки неравномерно распределенные напряжения в области концентратора напряжений превосходят предел текучести в очень ограниченных зонах, где происходит пластическая деформация. После снятия нагрузки пластически деформированные участки в области мак-



симальных напряжений не могут восстановиться до своих первоначальных размеров. Вследствие этого они оказываются под действием сжимающих напряжений и могут существенно уменьшить максимальные результирующие растягивающие напряжения при последующих циклах нагружения, а следовательно, и увеличить свою долговечность. Если же растягивающие напряжения от внешней нагрузки не вызывают пластической деформации материала в области концентратора напряжения, то материал постоянно находится под действием повышенных напряжений, и долговечность его будет пониженной. В любом случае концентратор напряжений локализует область повышенного уровня напряжений, что снижает объемы пластически деформированного материала, а следовательно, и уровень скорости счета сигналов АЭ в начале нагружения материала, но при этом изменяется его жесткость локального напряженного состояния.

Высокая степень приближения зависимостей

$\lg \dot{N}_{\text{АЭ}} = f(\lg N)$  для некоторых лопаток без надреза к таковым для лопаток с надрезом свидетельствует о том, что в материале этих лопаток без явно выраженного концентратора напряжений последний фактически присутствует. Это могут быть различные включения, несплошности материала или просто крупные неблагоприятно ориентированные зерна, что снижает характеристики сопротивления усталости.

Результаты проведенного исследования показали наличие достаточно тесной связи между долговечностью лопаток и скоростью счета сигналов АЭ на определенном уровне их нагружения. Однако эта зависимость неоднозначна и определяется жесткостью напряженного состояния микрообъемов поверхностного слоя, обуславливающего действие разных механизмов усталостного разрушения лопаток. Следовательно, для прогнозирования долговечности последних на заданном уровне напряжений необходимо определить не только действительное локальное напряженное состояние материала, но и его жесткость, которая обусловлена объемом пластически деформированной его части и может определяться по параметрам АЭ.

Уровень локального напряженного состояния конкретной детали — величина перманентная, определяемая уровнем  $\dot{N}_{\text{АЭ}}$  при  $\sigma_a = 0,6\sigma_{-1}$ . Жесткость напряженного состояния является величиной дискретной и может быть определена по особенностям АЭ характеристик. В работе [13] показано, что АЭ характеристики лопаток компрессора из сплава титана без надреза имеют вид S-образных кривых, но у лопаток после НТЦ наблюдается задержка появления АЭ, что объясняется упрочнением поверхностного слоя. При этом у лопаток с большей долговечностью задержка более длительна. Специфика образования АЭ, характеризующая локальное напряженное состояние материала лопаток с концентратором напряжений, состоит в явной задержке излучения сигналов АЭ с последующим его интенсивным ростом. При этом АЭ характеристика имеет Г-образную форму.

Наличие тесной связи между скоростью счета сигналов АЭ  $\dot{N}_{\text{АЭ}}$  при номинальных напряжениях, меньших предела усталости ( $\sigma_a < \sigma_{-1}$ ), и долговечностью  $N_p$  лопаток при номинальных напряжениях выше предела усталости ( $\sigma_a > \sigma_{-1}$ ) свидетельствует о взаимосвязи деформационных процессов в микрообъемах материала на этих уровнях макронапряжений в нем. Тот факт, что зависимости (1), (2) представляют собой одинаковые функции разных аргументов, свидетельствует о подобии процессов, которые они описывают, что позволяет прогнозировать долговечность конкретной детали на заданном уровне усталостных испытаний методом АЭ.

Зависимость скорости счета сигналов АЭ  $\dot{N}_{\text{АЭ}}$  на фиксированном уровне напряжения  $\sigma_{\text{АЭ}}$ , меньшем предела усталости  $\sigma_{-1}$ , от долговечности лопаток  $N$  на фиксированном уровне напряжений  $\sigma_{\text{а1}}$  в области многоциклового усталости дает возможность по скорости счета сигналов  $\dot{N}_{\text{АЭ}}$  при  $\sigma_{\text{АЭ}}$  и особенностям АЭ характеристики определить долговечность конкретной лопатки  $N_1$  при напряжении  $\sigma_{\text{а1}}$ . Тогда прямая, проведенная из полюса диаграммы усталости генеральной выборки через точку с координатами  $(N_1, \sigma_{\text{а1}})$ , является диаграммой усталости выборки лопаток одинаковой усталостной прочности с исследуемой лопаткой. Она позволяет прогнозировать долговечность последней на любом уровне напряжений в области многоциклового усталости.

Следует отметить, что даже незначительное изменение в технологии изготовления детали может существенно изменить жесткость напряженного состояния ее материала, а следовательно, и ее долговечность. При этом необходима корректировка как диаграммы усталости генеральной выборки в координатах  $\lg \sigma_a = f(\lg N)$ , так и зависимости  $\lg \dot{N}_{\text{АЭ}} = f(\lg N)$ .

## ВЫВОДЫ

1. Деформационные процессы, проходящие в микрообъемах материала при действии монотонных макронапряжений, меньших предела выносливости, и переменных напряжений в области многоциклового усталости описываются одинаковыми уравнениями, что свидетельствует о их подобии.
2. Долговечность детали определяется локальным напряженным состоянием материала и его жесткостью, причем первый параметр материала определяется интенсивностью потока АЭ на фиксированном уровне макронапряжения, а второй — особенностями АЭ характеристик.
3. Результаты проведенных исследований дают возможность прогнозировать неразрушающим методом АЭ долговечность конкретных деталей в области многоциклового усталости.

1. Трипалин А. С., Буйло С. И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. — Ростов. гос. ун-т, 1986. — 160 с.
2. Бунина Н. А. Исследование пластического деформирования металлов методом акустической эмиссии. — Ленинград. гос. ун-т, 1990. — 156 с.



3. Буйло С. И. Искажение параметров сигналов АЭ и некоторые особенности восстановления статистических характеристик источников излучения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 1. — С. 15–23.
4. Буйло С. И. Вероятностно-информационные аспекты оценки достоверности результатов неразрушающего контроля и диагностики прочности твердых тел // Дефектоскопия. — 1996. — № 5. — С. 20–25.
5. Буйло С. И. О связи параметров акустической эмиссии с особенностями кинетики деформации и микроразрушения твердых тел // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. — Ростов. гос. ун-т, 1989. — Ч. 1. — С. 125–132.
6. Беженов А. И., Беженов С. А. Исследование методом акустической эмиссии влияния поверхностной обработки на характеристики циклической прочности образцов из никелевого сплава // Пробл. прочности. — 1999. — № 3. — С. 139–145.
7. Беженов С. О. Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії // Нові матер. та технології в металургії та машинобуд. — 1999. — № 1. — С. 16–19.
8. Беженов С. А., Буйло С. И. Некоторые аспекты диагностики долговечности и предразрушающего состояния конструкционных материалов методом акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 24–27.
9. Коллиз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
10. Геминев В. Н., Балыбердин В. С. Обобщенная функция накопления повреждений при усталости // Усталость и вязкость разрушения металлов. — М.: Наука, 1974. — 262 с.
11. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. — М.: Машиностроение, 1978. — 302 с.
12. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
13. Буйло С. И., Беженов С. А. Исследование особенностей акустического излучения при деформировании сплава титана и некоторые результаты АЭ диагностики его предразрушающего состояния // Дефектоскопия. — 2000. — № 5. — С. 3–11.

Запорозж. нац. техн. ун-т

Поступила в редакцию  
03.06.2002

## СТМ фирма «СЕРВИС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН»

**Производит приборы для контроля, диагностики, наладки и ремонта технологического оборудования**



Анализатор спектра вибрации 795М — прибор для измерения и анализа параметров вибрации, балансировки, ремонта и наладки оборудования. Основные технические характеристики прибора ставят его в ряд современных диагностических средств, высокая разрешающая способность позволяет точно выявить любой дефект в полевых условиях, на месте эксплуатации механизма. Возможности выполнения многоплоскостной динамической балансировки в собственных опорах, измерения амплитудо-фазочастотных характеристик на режимах разгона/выбега, контроль подшипников по огибающей и методу ударных импульсов существенно расширяют возможности использования прибора при ремонте и наладке.

**Работы по обслуживанию, наладке и ремонту оборудования по фактическому состоянию.  
Балансировка роторов на месте.  
Лазерная выверка соосности валов и валопроводов**

тел./факс: (0512) 24 31 97; e-mail: [stm@aip.mk.ua](mailto:stm@aip.mk.ua);  
<http://www.stmnik.narod.ru>



Индикатор вибродиагностический 77Д11 — прибор для контроля технического состояния подшипников качения методом ударных импульсов.