

О ЛОКАЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРЕДЕЛЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

В. Л. БУСОВ, В. А. ТРОИЦКИЙ, И. В. ШИШКИН

Приведено теоретическое обоснование метода определения предела ограниченной выносливости в локальных объемах вблизи точек опасных сечений конструктивных элементов с применением неразрушающих акустических методов контроля: метода обратного рассеяния (акустическая кривая усталости (АКУ)), метода осцилляций сигнала (акустический аналог кривой роста микротрещин) и упрощенного метода акустической эмиссии (один канал без триангуляции). Приведена зависимость средней крутизны восходящего участка АКУ от амплитуды приложенного напряжения.

The paper gives theoretical substantiation of the method of determination of fatigue strength in local volumes near the points of critical sections of structural elements with application of non-destructive acoustic NDT methods, namely back-scattering method (acoustic fatigue curve (AFC)), signal scintillation method (acoustic analog of microcrack growth curve) and simplified acoustic emission method (one channel without triangulation). Dependence of average steepness of the ascending section of AFC on the applied stress amplitude is given.

При определении предела выносливости σ_r [1, 2] критерием разрушения металлических образцов является «... возникновение трещин, определяемых методами дефектоскопии (например, магнитным, ультразвуковым или оптическим) ...». При определении σ_r необходимо учитывать поликристаллическое строение материала образца или детали и разрешающую способность методов дефектоскопии. Анализ современного состояния физики пластичности и разрушения [3, 4] при усталостных процессах [5] показывает, что минимальная длина устойчивых микротрещин 0,07...0,1 мкм связана как с наличием изломов и тройных стыков наследственных границ зерен, так и с границами возникших в процессе пластической деформации первичных (в поперечнике 0,1...1 мкм) и вторичных (0,01...0,1 мкм) фрагментов (нанофрагментов); микротрещины на таких границах возникают в результате взаимодействия двух механизмов разрушения — микросдвига и микроотрыва при достижении локальных микронапряжений на границах критических значений (τ_c , σ_c), при этом значения напряжений на границах существенно выше по сравнению с объемами фрагментов [6]. Отсюда σ_r становится макрохарактеристикой, обусловленной влиянием локальных полей внутренних напряжений с учетом пространственных положений и ориентаций различных структурных элементов образца: фрагментов; зерен (10...300 мкм). Разрешающая способность капиллярного [7], магнитовихревого [8] и ультразвукового [8] НК колеблется в пределах 5...100 мкм. Однако традиционные методы не позволяют проводить контроль зарождения, роста и накопления повреждений (микротрещин, пор и т. д.) в процессе

эксплуатации детали (in situ) (кроме метода акустической эмиссии [9, 10]). Необходим такой метод или методы, которые обеспечили бы выявление начала зарождения устойчивых микротрещин, осуществили контроль за ростом их размеров и числа, и одновременно позволили найти амплитуду внешнего напряжения σ_a , при котором это происходит. Здесь необходимо отметить, что такая задача уже была поставлена в работе [11], где теоретически и экспериментально обоснована связь между процессами накопления усталостных повреждений и неупругого деформирования. В качестве датчиков усталостного повреждения были использованы тензорезисторы, позволяющие фиксировать форму и размеры петли механического гистерезиса, а вместе с ней энергию, на рассеянную на протяжении цикла. Кроме того, предложены соответствующие ускоренный метод определения σ_r на базе нескольких образцов, а в ряде случаев и одного образца, установка для его осуществления и деформационные и энергетические критерии усталостного разрушения, основанные на связи полной $\Delta\varepsilon_\Sigma$ или пластической $\Delta\varepsilon_{pl}$ деформации за цикл, коэффициента относительного рассеяния энергии за цикл Ψ^c от количества циклов до разрушения N . Как уже отмечалось, в начале разрушение происходит в локальных объемах зерен вблизи опасных точек опасных сечений элементов конструкций, а затем уже в результате необратимого процесса происходит увеличение размеров и количества устойчивых микротрещин в ансамбле, трансформация в очаг разрушения и объединение микротрещин в магистральную макротрещину.

В работах [12–15] рассмотрена акустическая кривая усталости (АКУ) — зависимость коэффициента затухания ультразвуковых волн α_d от ко-



личества циклов N_c . Семейство таких кривых при различных значениях внешнего напряжения $\sigma^{(i)}$, от предела выносливости σ_r до предела прочности σ_b , и коэффициента асимметрии цикла r можно рассматривать как аналог классической кривой усталости $\sigma^{(i)} = \sigma^{(i)}(N_c)$. В настоящее время известны и другие аналоги классической кривой усталости: акустические — по скорости распространения ультразвуковых волн [16, 17], по скорости счета сигналов акустической эмиссии (АЭ), другим ее энергетическим и амплитудно-частотным характеристикам [18, 19]; магнитные — по коэрцитивной силе [20], по изменению магнитного потока, намагниченности с помощью датчика Холла [21], по амплитуде сигналов магнитоакустической эмиссии, сопровождающей шумы Баркгаузена [22]; оптические — по смещению линий интерференционных картин от лазерного излучения [23].

Приведенная выше АКУ содержит ряд характерных участков и точек: инкубационный период, участок снижения, минимум, восходящий участок, максимум, плато или участок слабого снижения. В работе [15] установлено соответствие между основными этапами пластической деформации и характерными участками и точками. Отмечено, что начало восходящего участка ([14], рис. 1, точка a) соответствует началу зарождения устойчивых микротрещин, а его конец (там же, точка b) — началу объединения ансамбля микротрещин в макротрещину в пределах зерен поликристалла. Кривая восходящего участка имеет в точке перегиба общую касательную, крутизна которой в основном зависит от приложенного внешнего напряжения $\sigma^{(i)} = \sigma_a$ [12, 13]. Характер этой зависимости в литературе не описан. Кроме того, участок предразрушения, включающий максимум и участок слабого снижения, составляет, например, в условиях одноосного растяжения, не более 10 % общей долговечности образца [4].

В работе [24] рассмотрен критерий предшествующего разрушения для своевременной замены усталостно-поврежденного изделия, осуществляемый с помощью трех неразрушающих методов: упрощенного метода АЭ (один канал без триангуляции), метода обратного рассеяния (АКУ) и метода осцилляций сигнала. Показано, что метод осцилляций сигнала является активным низкочастотным аналогом метода АЭ.

Большой интерес также вызывают вероятностные модели (В-модели) накопления поврежденных [25], где такие процессы принимаются стохастическими и марковскими. Для серии стандартных образцов на базе экспериментальных данных: эмпирических выборочных распределений вероятностей строится математическая интегральная кривая распределения вероятностей

времени до отказа или долговечности F_w со своими средним временем долговечности m_w и дисперсией σ_w^2 . Обращает на себя внимание подобие кривой восходящего участка АКУ и вероятностной кривой F_w по форме и расположению на плоскости первого квадранта системы координат независимо от вида нагружения, материала образцов и конструктивных элементов за исключением участка предразрушения, где на кривой АКУ имеет место максимум и слабое снижение, а на кривой F_w — медленное приближение к асимптоте.

Целью данной работы является построение подгоночной модели F_w путем оценки всех ее параметров и значений m_w , σ_w^2 на базе восходящего участка АКУ; рассмотрение ускоренного неразрушающего метода определения предела выносливости натурального образца или конструктивного элемента путем установления критерия усталостного разрушения на базе акустической кривой усталости, позволяющего найти зависимость средней крутизны ее восходящего участка от амплитуды внешнего напряжения, а вместе с ней и локальный предел ограниченной выносливости вблизи опасных точек опасных сечений этих элементов.

Теоретическая модель. Обозначим среднюю крутизну восходящего участка АКУ через $\bar{\chi} = \text{tg}\beta$. При $\sigma_a \rightarrow \sigma_b$ угол $\beta \rightarrow \pi/2$; при $\sigma_a \rightarrow \sigma_r$ угол $\beta \rightarrow 0$. Качественное решение поставленной задачи приведено в работе [13], где рассматривается условие появления минимума на АКУ под влиянием двух эффектов — рассеяния на наследственных границах зерен и межфрагментных границах деформационного происхождения ($\alpha_{gr} + \alpha_{fr}$), поглощения на линейных дефектах α_d в процессе пластической деформации и третьего эффекта — рассеяния на границах микротрещин α_{cr} [14]. Если третий эффект отсутствует (в образце нет микротрещин), а два первых эффекта влияния на характер кривой равны, но взаимно противоположны по знаку, то минимум АКУ вырождается в плато. Математическое условие такого вырождения можно записать в виде:

$$\frac{d\alpha_\Sigma}{dN} \Big|_{\alpha = \alpha_{\min}} = 0, \quad (1)$$

где значение α_Σ рассматривается в виде суммы коэффициентов рассеяния на границах зерен α_{gr} , фрагментов α_{fr} , микротрещин α_{cr} и поглощения α_{ab} .

Вблизи минимума АКУ $\frac{d(\alpha_{gr} + \alpha_{fr})}{dN} = -\frac{d\alpha_d}{dN}$ и выражение (1) упрощается:



$$\frac{d\alpha_{cr}}{dN}\Big|_{\alpha=\alpha_{min}} = 0. \quad (2)$$

В работе [26] проведена оценка всех вкладов деформирующего напряжения при фрагментации и найдено их соотношение. Здесь в первом приближении можно воспользоваться равномерным распределением привнесенной в образец энергии по вкладам, соответствующие трансляционные и поворотные моды пластичности осуществляют своевременную релаксацию этой энергии по объему без нарушения его сплошности. При $\sigma_a > \sigma_r$ указанные выше моды уже не успевают своевременно перераспределять поступающую в образец энергию и единственным механизмом релаксации становится образование и рост микротрещин. Одним из основных достижений физики пластичности и разрушения является автомодельность процессов при фрагментации и зарождении и росте микротрещин, т. е. характер и последовательность процессов во фрагментированном объеме и в вершине микротрещины совпадают [27, 28]. Отсюда по аналогии с выражением составляющей тензора деформирующего напряжения σ_f , работа которой идет на рост упругой энергии фрагментов [26, 29], можно построить составляющую σ_{cr} , работа которой идет на зарождение и рост устойчивых микротрещин, заменив координату z (пространственное представление) на количество циклов N (временное представление):

$$\hat{\sigma}_{cr}(N) = \frac{1}{\gamma_\alpha} \hat{c}^* \cdot \left[\frac{d\alpha_{cr}}{dN} (\hat{E}^{el}(N))^2 + \alpha_{cr} \hat{E}^{el} \cdot \frac{d\hat{E}^{el}(N)}{dN} \right] \times \left(\frac{d\hat{E}^{pl}(N)}{dN} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где \hat{c}^* — эффективный тензор модулей упругости [29]; (\cdot) — оператор свертывания индексов; \hat{E}^{el} , \hat{E}^{pl} — тензоры средней упругой и соответственно пластической деформации; коэффициент пропорциональности γ_α в рэлеевском приближении приведен в работе [24], причем $\alpha_{cr} = \gamma_\alpha n_{cr} V_{cr}$, где n_{cr} — плотность микротрещин; V_{cr} — средний объем микротрещины. Если обозначить количество циклов до начала появления микротрещин через N_a , то в начале восходящего участка АКУ (точка a) средние деформации равны соответственно \hat{E}_a^{el} , \hat{E}_a^{pl} ; первый член в квадратных скобках обратится в нуль, а произведение $\hat{c}^* \cdot \hat{E}_a^{el}$ можно рассматривать как циклический предел упругости σ_c^{el} [11].

Отметим, что в методе обратного рассеяния [30] алгоритм обработки сигналов, рассеянных от структуры ультразвуковых волн, играет основную

роль, причем выделение информации проводится путем стробирования участков огибающей рассеянного эхо-сигнала. Как известно, время релаксации растет с увеличением размеров исследуемой системы [31], в данном случае размера участка стробирования L . В связи с этим представляет интерес режим циклического нагружения [11] образца диаметром 5...12 мм, где имеет место ступенчатое повышение нагрузки с высотой ступени 10...20 МПа и шириной $\Delta N = 10^4 \dots 10^5$ циклов. Отсюда при длине участка стробирования 3...5 мм локальный предел выносливости σ_{rN} совпадает с глобальным σ_r , при длине участка, равной минимально возможной цене деления шкалы экрана $1 \cdot 10^{-4}$ м этот предел отличен от σ_r . Условие (2) отражает математический смысл и для практики должно быть модифицировано. Для этого отношение дифференциалов $d\alpha_{cr}$ и dN в правой части (2) заменяем отношением порога абсолютной чувствительности акустического тракта $(\Delta\alpha)_{п.ч}$ к $\Delta N(L)$, причем при минимальном участке стробирования ширина ступени снижается до $10^3 \dots 10^4$ циклов, а разность $\sigma_a - \sigma_{rN}$ не должна превышать порог абсолютной чувствительности силоизмерительного тракта $(\Delta\sigma)_{п.ч}$ (для тензорезисторов этот порог порядка 1 МПа); в результате равенство (2) переходит в неравенство:

$$\frac{d\alpha_{cr}}{dN}\Big|_{\alpha=\alpha_a} \leq \frac{(\Delta\alpha)_{п.ч}}{\Delta N(L)}. \quad (4)$$

Согласно иерархии структурных уровней деформации [3, 4, 6] система уравнений: вид уравнений, характер и форма зависимостей, описывающих процессы пластической деформации (ПД) и разрушения, на каждом структурном уровне свой, но в пределах уровня один и тот же. Например, на макроуровне для объема образца и пробного объема из произвольного наследственного зерна и его ближайших соседей-зерен типа кластера. Поэтому эмпирическое уравнение Мэнсона, связывающее размах полной деформации образца $\Delta\varepsilon$ с количеством циклов до разрушения N_d для малоциклового усталости:

$$\Delta\varepsilon = 2\varepsilon_a = 3,5 \frac{\sigma_b}{E} N_d^{-0,12} + e_d^{0,6} N_d^{-0,6}, \quad (5)$$

где первый член правой части представляет предельную упругую деформацию, а второй — предельную пластическую деформацию; E — модуль Юнга; e_d — истинные удлинения образца при разрушении (было распространено В. Т. Трошенко на многоцикловую усталость [11] и может быть использовано для указанной группы (кластера зерен).

Необходимо отметить, что при случайном распределении ориентаций зерен удлинения e_d для



различных зерен различны. Например, при удлинении образца 5 % удлинения ансамбля зерен могут колебаться от 2 до 4 % [32]. Совпадение удлинений для поликристаллического образца и отдельных зерен-монокристаллов, подчиняющихся при одноосном растяжении закону Шмида [32], возможно при существовании текстур и может быть использовано только в рамках грубой оценки.

Обозначим количество циклов в точке перегиба восходящего участка АКУ через N_{kn} , а средние деформации и коэффициент затухания ультразвуковых волн — соответственно \hat{E}_{kn}^{el} , \hat{E}_{kn}^{pl} и $\alpha_{cr}^{(kn)}$. Будем считать, что средние внутренние деформации \hat{E}^{el} , \hat{E}^{pl} как функции N , приближенно совпадают со значениями внешних предельных упругих и пластических деформаций в (5) для кластеров зерен, т. е. $\hat{E}^{el}(N_d)$ и т. д. Отсюда из выражения (3) с помощью (2), (5) при $\sigma_{cr}(N_{kn}) = \sigma_a$ можно оценить среднюю крутизну восходящего участка АКУ:

$$\text{tg}\beta = \frac{\alpha_{cr}^{(kn)} - \alpha_{\min}}{N_{kn} - N_a} = k_1(N)\sigma_a - k_2(N)\sigma^{el}(N), \quad (6)$$

где

$$k_1 = \frac{\gamma_\alpha}{2W(N)}, \quad (7)$$

$W(N)$ — удельная упругая энергия деформируемого поликристалла;

$$k_2 = 0,7 \frac{\alpha_{cr}\sigma_b}{\gamma_\alpha E e_d^{0,6}} N^{0,48}, \quad (8)$$

$$\sigma^{el}(N) = \hat{c}^* \cdot \hat{E}^{el}(N) \approx 1,75 \sigma_b N^{-0,12}. \quad (9)$$

Для данного восходящего участка со своей средней крутизной $\bar{\chi}$ как функцией σ_a существует соответствующая кривая F_w со своими $m_w(\sigma_a)$, $\sigma_w^2(\sigma_a)$. Действительно, для трех точек классических кривых усталости (кривых Веллера), полученных для больших выборок стандартных и плоских образцов (75...300) из нескольких марок сталей и алюминиевых сплавов были найдены зависимости «логарифм m_w — напряжение σ_a », «логарифм дисперсии σ_w^2 — напряжение σ_a » и «отношение сигнал-шум: m_w/s_w — средняя долговечность m_w ». Первые две кривые являются отрезками убывающих гипербол с ростом σ_a ; третья — выпуклая вверх парабола, имеет ярко выраженный максимум. Если воспользоваться наиболее простой стационарной В-моделью с единичными скачками [25], где существенны только два пара-

метра: b — целое число, равное числу ступеней выборочной ступенчатой функции (ВФ) распределения вероятностей :

$$b = \frac{N_{\max}}{\Delta N(L)}, \quad (10)$$

где N_{\max} — количество циклов, соответствующее максимуму на кривой АКУ; $\Delta N(L)$ — ширина ступени ВФ; $r_j = p_j/q_j$ — отношение вероятностей сохранения состояния в пределах данной j -й ступени p_j и перехода в новое состояние, с более высокой степенью поврежденности q_j , причем $r_j = r_c = \text{const}$, то для первых двух кривых: 1) из (6)–(9) становится очевидной надежная корреляционная связь между значением средней крутизны $\bar{\chi}$ восходящего участка АКУ и данной кривой $F_w(b; r_c; a_w)$ с вероятностью выживания a_w , $a_w = 0,05; 0,1; 0,15$; 2) связь величин m_w , отношения m_w/σ_w и параметров b, r_c можно выразить в виде системы простых уравнений:

$$m_w = (b - 1)(1 + r_c), \quad (11)$$

$$\frac{m_w}{\sigma_w} = \sqrt{m_w/r_c}, \quad (12)$$

где σ_w — среднее квадратичное отклонение выборки.

Третья кривая $m_w/\sigma_w - m_w$ (12) приводит к гипотезе Статга: «отношение сигнал/шум зависит только от m_w , но не зависит от среднего напряжения цикла» [25]. Отсюда, задав r_c , легко произвести оценку b . В то же время условие $r_j = \text{const}$ на всем интервале восходящего участка АКУ является физически нереальным вследствие монотонно возрастающего упрочнения в среднем, но может быть распространено на любую пару рядом стоящих ступеней ВФ.

Таким образом, при определении σ_{rN} известные ступенчатые режимы нагружения [11] можно изменить, разбивая их на пары ступеней и применяя к этим парам метод последовательных приближений, когда одна из ступеней пары имеет $\sigma_a > \sigma_r$, а другая — $\sigma_a < \sigma_r$, причем пары ступеней разделены либо скачком вверх, если вторая ступень пары имеет $\sigma_a < \sigma_r$, либо скачком вниз, если вторая ступень пары имеет $\sigma_a > \sigma_r$. Такой режим проводится до тех пор, пока высота ступени очередной пары не совпадет с порогом абсолютной чувствительности силоизмерительного тракта $(\Delta\sigma)_{п.ч}$ [33]. **Обсуждение результатов.** В основе данного подхода заложена идея замены совокупности стандартных образцов при усталостных испытаниях на ансамбль кластеров зерен — монокристаллов, определяющая по существу идеальное техничес-



кое решение (ИТР). Здесь мы стремимся максимально приблизиться к этому решению. Для этого на частоте заполнения ультразвукового звука импульса 10 МГц участок стробирования на экране дефектоскопа длиной 3...10 мм разбивается на 50...100 отрезков, каждый из которых соответствует одному пробному объему с площадью основания — поверхности пьезопреобразователя и высотой на размер кластера зерен. Для такого пробного объема изначально имеет место усреднение по поверхности пьезопреобразователя, что не позволяет произвести такую замену для решения, полностью адекватного ИТР. Тем не менее, в ряде случаев: поликристаллов преимущественной ориентировки с малым разбросом, текстур после прокатки, волочения и поверхностной закалки и т. д. эта процедура замены становится приемлемой.

Такой подход принципиально отличается от уже существующего тем, что в нем напрямую учитывается стохастичность процесса ПД и разрушения поликристаллических материалов через использование ряда случайных распределений ансамбля фрагментов, зерен, микротрещин по количеству, размерам и ориентациям в пространстве и времени. Благодаря этому и возникает качественное подобие кривых F_w и восходящего участка АКУ. Для строгого количественного обоснования этого подобия необходимо знать вид этих распределений и характер их эволюции во времени в каждом конкретном случае: материал, размеры, состояние поверхности образцов, вид нагружения, влияние окружающей среды и т. д., что само по себе представляет сложную задачу. Поэтому в данной работе ограничимся описанным выше феноменологическим подходом.

Порог абсолютной чувствительности акустического тракта при данном подходе не превышает цену деления аттенюатора дефектоскопа 0,1...1 дБ [8]. Теоретический порог абсолютной чувствительности внутренних механических напряжений без учета чувствительности измерительной аппаратуры определяется произведением минимально возможной погрешности измерения деформаций: 1 мкм/м [34] и модуля Юнга для константана и сплава карма $(1,2...1,6)10^{11}N$ [35], т. е. 0,1 МПа. На практике при деформациях на протяжении цикла не ниже $1 \cdot 10^{-5}$ мм/мм [11] оценка этого порога $(\Delta\sigma)_{п.ч}$ составляет 1...2 МПа в зависимости от материала тензорезистора.

Выводы

1. Предложен новый ускоренный метод определения долговечности и предела ограниченной выносливости в локальных объемах вблизи опасных точек опасных сечений конструктивных элементов с помощью трех неразрушающих акустических ме-

тодов контроля: упрощенного метода АЭ (один канал без триангуляции), метода обратного рассеяния на базе АКУ и метода осцилляций сигнала как аналога кривой роста микротрещин.

2. Данный метод имеет следующие характеристики: локальность контроля не ниже $0,1 \times 3 \times 6$ мм³; толщина информационного слоя до 100 мм.

3. Метод позволяет контролировать конструктивный элемент непосредственно в процессе его эксплуатации и произвести своевременную замену усталостно-поврежденного элемента для его возможного восстановления методами обработки металлов давлением [24, 36].

1. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів. — Киев: Вища шк., 2004. — С. 562–570.
2. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. — М.: Металлургия, 1990. — 623. с.
3. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. — Наука: Новосибирск, 1985. — 228. с.
4. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 224. с.
5. Синергетика и усталостное разрушение металлов / Под ред. В. С. Ивановой. — М.: Наука, 1989. — 247. с.
6. Владимиров И. В. Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984. — 280. с.
7. Маслов Б. Г. Дефектоскопия проникающими веществами. — М.: Высш. шк., 1991. — 255. с.
8. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справ. В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1986. — 352. с.
9. Грешиников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия (применение для испытаний материалов и изделий). — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272. с.
10. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных изделий. — М.: Машиностроение, 1981. — С. 256.
11. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. — Киев: Наук. думка, 1981. — 342. с.
12. Бусов В. Л., Шермергор Т. Д. Рассеяние ультразвуковых волн в поликристаллах при развитой пластической деформации на стадии фрагментации // Физика и техника высоких давлений. — 2002. — № 1. — С. 60–64.
13. Бусов В. Л. Поглощение ультразвуковых волн в пластически деформированных поликристаллах // Там же. — 2005. — С. 112–116.
14. Бусов В. Л. Рассеяние ультразвуковых волн на микротрещинах в фрагментированных поликристаллах // Акустический вестник НАНУ. — 2007. — № 3.
15. Hirotsugu J., Yoshikiyo M., Masahiko H. Acoustic study of dislocation rearrangement at later stages of fatigue. Noncontact prediction of remaining life // J. Appl. Phys. — 2002. — № 91, № 4. — С. 1849.
16. О зависимости скорости распространения ультразвука от числа циклов при усталостных испытаниях / С. В. Коновалов, С. Н. Горлова, О. С. Лейкина // III Всерос. науч.-техн. конф. «Новые химтехнологии: производство и применение». — Пенза: Изд-во Приволж. Дома знаний, 2000. — С. 25–26.
17. Грецкая И. А., Коновалов С. В., Соснин О. В. Возможность построения кривых усталости по данным измерения скорости ультразвука // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2002. — № 11. — С. 77.
18. Буденков Г. А., Недзвецкая О. В., Бахтин А. В. Акустика растущих трещин // Вестник Ижевс. гос. тех. ун-та. — 1998. — № 1. — С. 20–26.
19. Пенкин А. Г., Терентьев В. Ф., Маслов Л. И. Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кине-



- тической твердости. — М.: Интерконтакт Наука, 2005. — С. 69.
20. *Безлюдько Г. Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным коэрцитиметрическим способом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 20.
 21. *Evaluation of residual stresses and plastic deformation for iron-based materials by leakage magnetic flux sensors / K. Masatoshi, Y. Shinsuke, Yamada Koji, I. Yoshihiro // J. Alloys and Compounds.* — 2001. — **314**, № 1-2. — Р. 232.
 22. *Горкунов Е. С., Хамитов В. А., Бартнев О. А.* Магнитоакустическая эмиссия в пластически деформированных ферромагнетиках // Дефектоскопия. — 1988. — № 9. — С. 10.
 23. *Akira M., Sinichi I., Kaoru S.* The basic study of the detection of metal fatigue by laser instituted thermal vibration (докл.) // Conf. on Engineering Thin Films with Ion Beam Nanoscale Diagnostics and Molecular Manufacturing, San Diego, Calif. 30–31 July 2001, Proc. SPIE2001, 4468. — Р. 171–178.
 24. *Бусов В. Л.* Об акустическом аналоге кривой роста усталостных трещин // Дефектоскопия. — 2008. — № 9. — С. 85.
 25. *Богданов Дж., Козин Ф.* Вероятностные модели накопления повреждений. — М.: Мир, 1989. — 340 с.
 26. *Бусов В. Л.* О соотношении вкладов составляющих деформирующего напряжения для фрагментированных поликристаллов // Физика и техника высоких давлений. — 2004. — **14**, № 1. — С. 62.
 27. *Иванова В. С.* Синергетика разрушения и механические свойства // Синергетика и усталостное разрушение металлов. — М.: Наука, 1989. — С. 6.
 28. *Глезер А. М., Метлов Л. С.* Мегапластическая деформация твердых тел // Физика и техника высоких давлений. — 2008. — **18**, № 4. — С. 21.
 29. *Абрамов В. С., Бусов В. Л., Заика В. Н.* О неразрушающем акустическом методе оценки остаточных напряжений в закаленном слое // Дефектоскопия. — 2008.
 30. *Бусов В. Л.* Акустический метод обратного рассеяния в опытах под нагрузкой и перспективы его развития // Физика и техника высоких давлений. — 2003. — **13**, № 1. — С. 145.
 31. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. — Ч. 1. Т. 5. — М.: Наука, 1976. — 583 с.
 32. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. — М.: Мир, 1972. — С. 103.
 33. Спосіб визначення границі витривалості / Бусов В. Л., Шишкин И. В., Иофин И. Д. // Заявка на патент № 2009 10772 от 26.10.2009 G 01 N 3/34; G 01 N 29/44.
 34. *Дэлли Д., Райли У.* Тензодатчики. Экспериментальная механика. — В 2-х кн. Кн. 1. / Под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — С. 54.
 35. *Таблицы физических величин.* Справ. / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — С. 48.
 36. *Механические свойства материалов под давлением / Под ред. Х. Л. Хью.* — Вып. 2. Применение высоких давлений в технологических процессах. — М.: Мир, 1973. — 375 с.

Донбас. гос. машиностроит. акад.,
Краматорск

Поступила в редакцию
12.10.2009

ДЕВ'ЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»

**відбудеться 27–28 квітня 2010 р.
в Національному технічному університеті України
«Київський політехнічний інститут»**

Кафедра ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ приладобудівного факультету НТУУ «КПІ» запрошує вчених, виробничі та сервісні компанії, які працюють в усіх галузях приладобудування, взяти участь у роботі конференції. Метою конференції є обмін досвідом фахівців з питань прецизійних технологій та нових рішень у приладобудуванні, зустрічі з керівниками провідних підприємств, формування спільних проектів, пошук партнерів для співпраці, формування інноваційних пропозицій.

Конференція буде проводитися за такими напрямками:

1. Теорія та практика навігаційних приладів і систем, систем керування та діагностики.
2. Оптичні та оптико-електронні прилади і системи.
3. Процеси виготовлення приладів, методи і засоби їх контролю.
4. Інформаційні технології, теорія проектування систем вимірювання механічних величин, мікро- і нанопристроїв.
5. Аналітичне та екологічне приладобудування.
6. Біомедичне приладобудування та технології.
7. Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика.
8. Прилади і системи обліку витрат енергоносіїв.

29 квітня 2010 р. відбудеться III Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». Запрошуємо всіх бажаючих взяти участь у роботі конференції.

Адреса оргкомітету:

Кафедра ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ приладобудівного факультету
Національного технічного університету України «КПІ»
03056, Київ, пр. Перемоги 37, приладобудівний ф-т, каф. ПСНК
тел: (044) 454-95-47, 454-95-48, e-mail: psnk@ntu-kpi.kiev.ua