

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ СО СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Анискович Е.В.

Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

Вопросы учета фактических прочностных механических свойств материалов имеют большое значение в развитии механики твердого деформируемого тела [1-3]. Классические представления [1, 4] о сплошном, однородном, изотропном, линейно-упругом теле не удовлетворяют при их практическом применении в расчетах сложных ответственных конструкций, так как почти все материалы обладают неоднородной структурой, т.е. являются композиционными материалами [6, 7], обладающими анизотропией физико-механических свойств [4-5, 8-11]. Широкое распространение структурно-неоднородных материалов в производстве в настоящее время предопределило развитие новых подходов и построение новых моделей в механике твердого деформируемого тела и механике разрушения [12-16].

При моделировании структурно неоднородных композитных систем в современных исследованиях зачастую используется прием рассмотрения деформирования материала на различных уровнях (работы Болотина В. В. [12, 18], Ильюшина А. А. [9], Кукаса [17], Ломакина В. А. [8, 19] и др.): на микроуровне, характеризуемом для структурно – неоднородных материалов размерами микрообъема, учитывающим характерные структурные особенности материала; на среднем уровне (мезоуровне) – минимальный объем структурно-неоднородного материала, который можно наделить осредненными свойствами макрообъема; и на макроуровне – определяемом характерными размерами тела в целом.

В настоящее время еще недостаточно исследована неоднородность напряженно-деформированного состояния конструкций из структурно неоднородных материалов. Вследствие этого, анизотропия механических свойств, приводящая к концентрации напряжений в металле, является одним из основных факторов уменьшения прочности конструкций и снижения их долговечности. Механизм структурной повреждаемости металла вычислялся в данной работе на среднем уровне – площадь с анизотропией свойств задавалась разбиением на конечные элементы (КЭ), при этом процесс разбиения расчетной модели на элементарную площадь плоскими КЭ (или объемными КЭ при объемной 3D модели) носил относительный характер, позволяющий минимизировать погрешность конечно-элементной сетки путем ее сгущения.

Как известно, любая дефектность (геометрическая или физическая нелинейность) приводит к концентрации напряжений. Анализ особенностей напряженно-деформированного состояния при наличии дефектов и/или трещин проведен в [12-13, 20-22]. Как обозначено в [12], в вершине концентратора формируется зона высвобождения энергии, по характеру и размеру подобная трещине. На основании этого можно считать, что любой дефект может быть критическим и явится причиной разрушения конструкции [2, 7, 12].

С учетом этого, проводилось моделирование трещины, расположенной в зоне структурной неоднородности прочностных механических свойств металла, определялось напряженно-деформированное состояние (НДС) и исследовались характеристики трещиностойкости. Зона структурной неоднородности прочностных механических свойств задавалась по фронту распространения трещины и разделялась границами конечных элементов. При этом, структурная неоднородность механических свойств задавалась значениями предела прочности и предела текучести, подчиняющимися опре-

деленным статистическим законам распределения случайно величины – нормальному и экспоненциальному законам распределения. Для каждого КЭ, расположенного по фронту распространения трещины, задавались определенные механические свойства, т.е. в каждом КЭ был смоделирован свой материал со своей кривая нагружения (деформирования).

Значения прочностных механических свойств (пределов текучести и прочности) не были смоделированы случайно, а были пересчитаны из значений твердости, взятых с отчетов по экспертизе промышленной безопасности (ЭПБ) опасных производственных объектов (ОПО) находящихся в эксплуатации. В основном, твердость малоуглеродистых сталей, из которых изготовлено подавляющее большинство ОПО, измеряется переносными твердомерами с ультразвуковыми датчиками методом вдавливания шарика в металл исследуемого объекта (метод измерения твердости по Бринеллю, НВ [23]). Используя известные исследования [24-25], числа твердости НВ из баз данных были пересчитаны в значения прочностных механических характеристик по формулам и графикам, представленным на рис. 1.

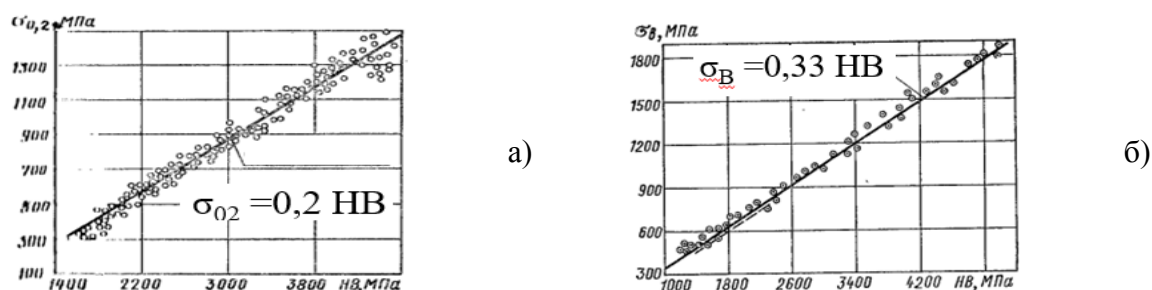


Рис. 1. Диаграммы и формулы зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ (а) и предела прочности σ_B (б) от твердости металла по Бринеллю

Полученные значения механических свойств были систематизированы в соответствии с нормальным или экспоненциальным законом распределения случайной величины. Для этого, была создана (по скриптам и блок-схемам, находящимся в общем доступе) программа на языке программирования C++, моделирующая случайные значения в диапазоне от 0 до 1, распределенные по определенному закону распределения. Программа имела простой пополняемый интерфейс, методы переключения между распределениями, накопительную память, а также возможность хранения и выборки результатов в текстовом виде. Программа производила расчет обратной функции распределения, т.е. по одной оси откладывались числа, находящиеся в диапазоне от 0 до 1 с равномерным распределением, а соответствующие им значения на второй оси были случайными, распределенными по необходимому закону, в частности по нормальному или экспоненциальному. Полученные значения случайных величин (в диапазоне от 0 до 1) пересчитывались с учетом диапазона изменения твердости (80...160 НВ), используя имеющуюся базу фактических значений твердости. Построение графиков осуществлялось в программе Statistika. Гистограммы распределений представлены на рис. 2. Численные характеристики статистических параметров – в таблице 1.

Для исследования напряженно-деформированного состояния тела с трещиной, с наличием анизотропии механических свойств была построена плоская КЭ-модель в программе Ansys, содержащая трещину длиной l и произведено ее разбиение на плоские КЭ – plane182. Анизотропия механических свойств задавалась путем присвоения каждому конечному элементу по фронту распространения трещины определенных значений пределов текучести и прочности (рис. 3), которые подчинялись в первом расчетной случае – нормальному закону распределения, а во-втором – экспоненциальному.

Механические свойства на определенной площади фронта трещины задавались посредством присвоения каждому КЭ своего материала, характеризующегося своей кривой деформирования (рис. 4). Тип материала в расчетной программе – Linear Isotropic (с заданием упругих характеристик – модуля Юнга E и коэффициента Пуассона η) и Multilinear Kinetic Hardening, (с возможностью задания точек на кривой деформирования - stress-strain point). Длина трещины изменялась от 10 до 80% от ширины расчетной модели.

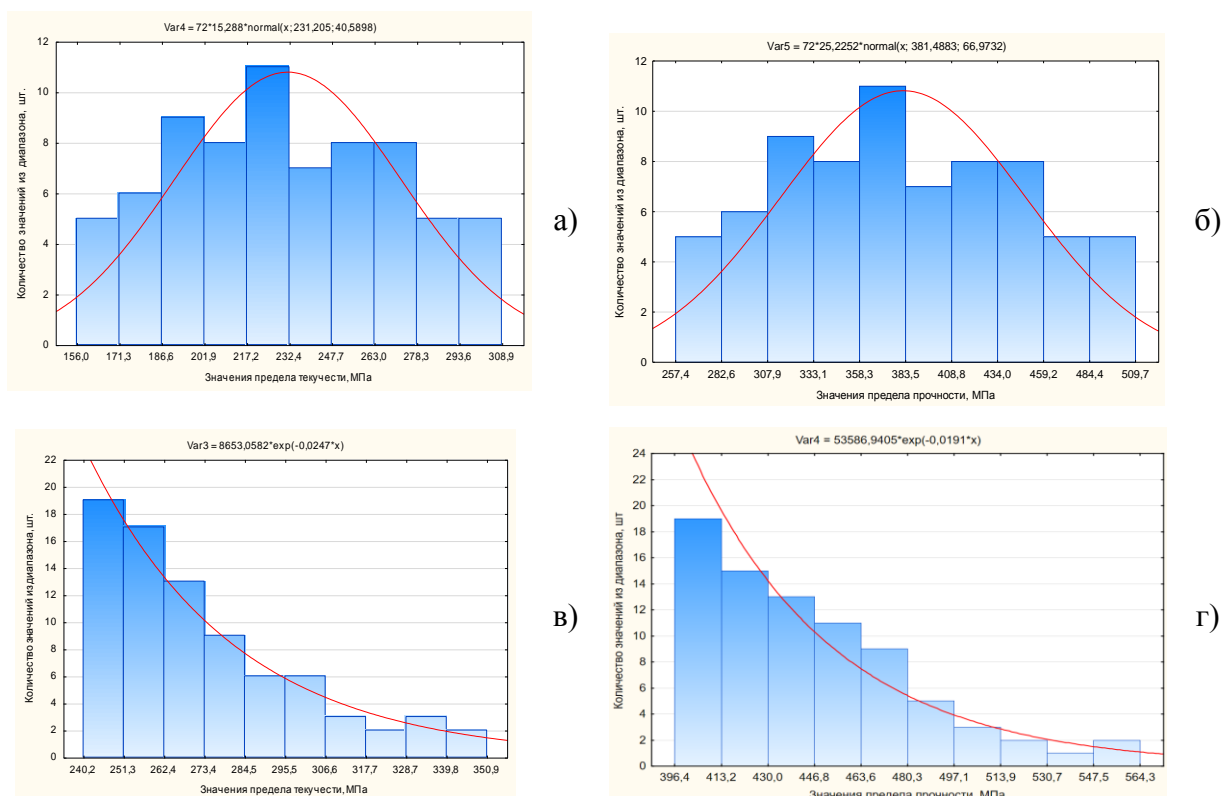


Рис. 2. Гистограмма распределения значений предела текучести σ_T и предела прочности σ_B : а и б – нормальное распределение; в и г – экспоненциальное распределение

Таблица 1. Статистические параметры

№	Статистические параметры	Нормальное распределение		Экспоненциальное распределение	
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	σ_B , МПа
1	Размер выборки	80	80	72	72
2	Среднее значение (mean)	273,16	445,49	231,21	381,49
3	СКО (standart deviation)	27,15	38,67	40,59	66,97
4	Доверит.интервал (confidence $\pm 95\%$)	267,12/279,21	436,49/453,70	221,67/240,74	365,75/397,23

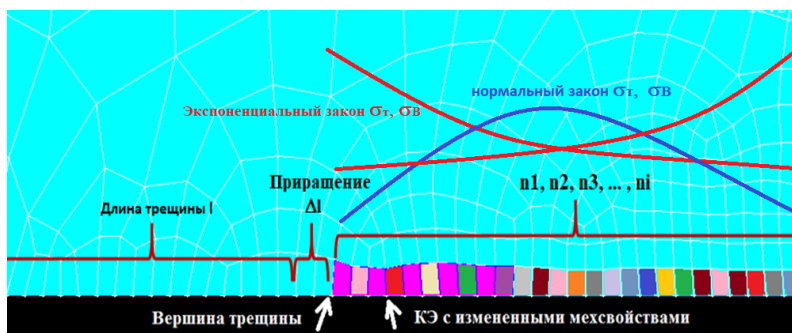
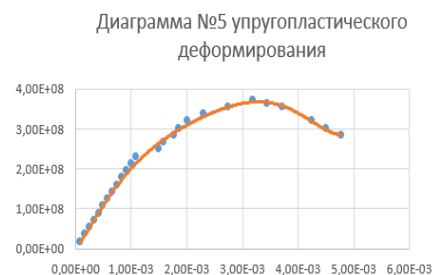


Рис. 3. Схема моделирования трещины и анизотропии механических свойств



σ_т=225,6 МПа; σ_в=372,2 МПа.
Рис. 4. Пример расчетной кривой σ-ε для одного КЭ

Для оценки критериев разрушения тела с трещиной и неоднородностью механических свойств использовались модели и критерии механики разрушения. Так, при упругом деформировании приближенной мерой сингулярности напряжений около вершины трещин, т.е. области предразрушения служила оценка коэффициентов интенсивности напряжений K_I – критерий Ирвина [26-27]

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y(1/W) \leq K_{IC}, \quad (1)$$

где $Y(1/W)$ – поправка (K-тарировка) на геометрию и схему нагружения [28].

Изменение условий деформирования в зоне вершины трещины от упругого к упругопластическому и увеличение размеров зоны пластической деформации приводят к необходимости использования критериев нелинейной механики разрушения, отражающие реальные закономерности поглощения энергии в зоне пластических деформаций. Одним из таких критериев является деформационный критерий, определяемый оценкой коэффициентов интенсивности деформаций K_e – критерий, обозначенный Махутовым Н.А. [26, 29]

$$\begin{cases} K_e = \left(\frac{K_I}{\sigma_T} \right)^p \leq K_{eC} & \text{при } \sigma_{ni} < \sigma_T; \\ K_e = \left(\frac{K_I}{\sigma_T} \right)^p \left(\frac{\sigma_{ni}}{\sigma_T} \right)^{\frac{1-N}{N(N+1)}} \leq K_{eC} & \text{при } \sigma_{ni} \geq \sigma_T. \end{cases}, \quad (2)$$

где $N=1/n$ – показатель деформационного упрочнения при степенной аппроксимации пластического участка диаграммы деформирования; n – показатель деформационного упрочнения, обозначаемый в формуле $\varepsilon/\varepsilon_0 = \alpha \cdot (\sigma/\sigma_0)^n$; σ_{ni} – уровень интенсивности номинальных напряжений (в ослабленном трещиной сечении); p – коэффициент

$$p = \frac{\left[2 - 0,5 \cdot (1 - N) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{ni}}{\sigma_T} \right) \right]}{1 + N}.$$

Очевидно, что наиболее перспективными являются модели интерполяции критериев хрупкого и пластического разрушения. Для этого использовалась 2-х критериальная оценка обобщенной характеристики трещиностойкости I_{ni} , предложенная Морозовым Е.М. [26]

$$I_{ni} = K_{IC} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{ni}}{\sigma_B} \right)^{1+n}} \leq I_C. \quad (3)$$

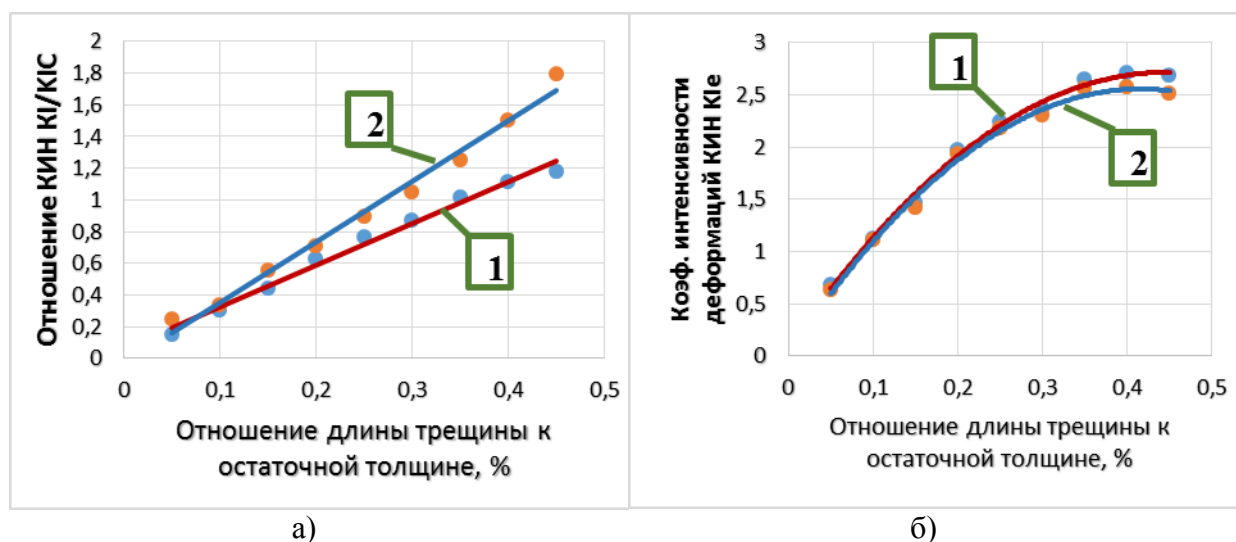


Рис. 5. Графики оценки по критерию Ирвина [26-27] (а) и критерию Махутова Н.А. [26, 29] (б) для модели с трещиной и структурной неоднородностью (1 – нормальный закон распределения мех. свойств; 2 – экспоненциальный закон распределения мех. свойств)

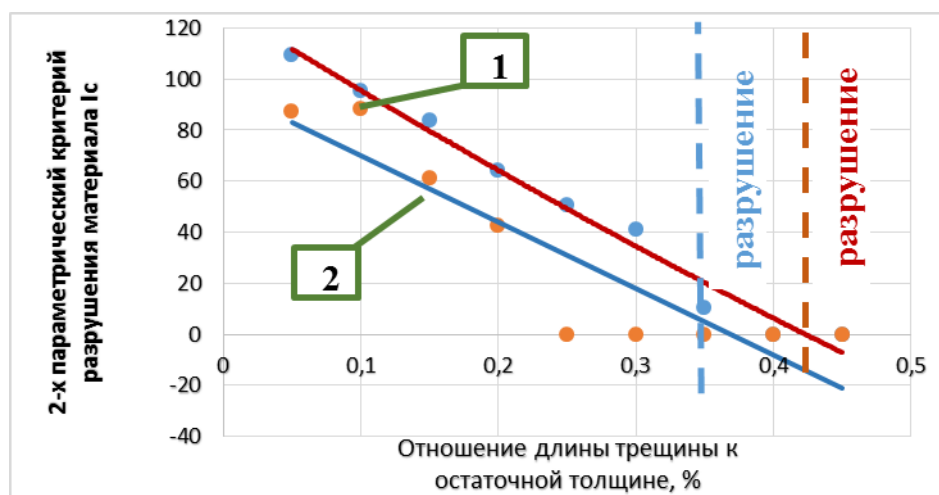


Рис. 6. График оценки по двухпараметрическому критерию Морозова Е.М. [26] для модели с трещиной и структурной неоднородностью

Проведенные исследования позволили оценить влияние анизотропии механических свойств, изменяющихся по нормальному и экспоненциальному закону распределения на критерии трещиностойкости. По полученным результатам можно сделать вывод о существующем влиянии закона распределения механических свойств на трещиностойкость материала. Так, по рис. 5, а и б видно, что напряжения выше при экспоненциальном распределении механических свойств, что не противоречит физическому

смыслу. С увеличением размера трещины – уменьшаются значения мехсвойств и, соответственно, уменьшается прочность. Разница в значениях характеристик трещиностойкости между экспоненциальным и нормальным законом распределения величин механических свойств находилась в диапазоне 0,61-0,8, в упругой области деформирования.

Литература

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1988. 712 с.
2. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М. : Машиностроение, 1981. 272 с., ил.
3. Вайнберг Д.В. Метод конечного элемента в механике деформируемых тел // Прикладная механика. 1972. Т. 8. № 8. С. 3-28.
4. Тимошенко С.П., Дж. Гудьер. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
5. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров и др. Киев : Вища школа – Лейпциг : ФЭБ Фахбухферпаг, 1982. 479 с.
6. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
7. Буров А.Е., Кокшаров И.И., Москвичев В.В. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов. Новосибирск: Наука, 2003. 173 с.
8. Ломакин В.А. Проблемы механики структурно-неоднородных твердых тел // Изв. АН ССР. Механика твердого тела. 1978. № 6. С. 45-52.
9. Ильюшин А.А. Некоторые проблемы неоднородной теории упругости // Проблемы теории пластичности. Механика. Новое в зарубежной науке. М. : Мир, 1976. № 7. С. 219.
10. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Л. : Машиностроение, 1980. 247 с.
11. Ташкинов М.А. Стохастическое моделирование процессов деформирования упругопластических композитов со случайным расположением включений с использованием моментных функций высоких порядков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 3. С. 163-185. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.09.
12. Буров А.Е. Модели разрушения волокнистых композиционных материалов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М.Ф. Решетнева. 2008. № 6. С. 133-138.
13. Соколкин Ю.В., Ташинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М. : Наука, 1984. 116 с.
14. Кукса Л.В., Евдокимов Е.Е. Метод оценки концентрации напряжений и деформаций на основе разработки физико-механических моделей структурно-неоднородных тел // Заводская лаборатория. 2001. Т. 67. № 1. С. 30-34.
15. Шленов А.Ю., Майборода В.П. К вопросу моделирования динамики структурно-неоднородных конструкций, МГИЭМ. 5 с., деп. в ВИНТИ 22.07.99 г., № 2409-В99.
16. Шленов А.Ю. Динамика структурно-неоднородных оболочечных конструкций с учетом упруго-пластических свойств материала : автореферат дис. кандидата физико-математических наук : 01.02.04. Моск. гос. ин-т электроники и математики. Москва, 2001. 18 с.
17. Пахомов А.Б. Изменение свойств структурно-неоднородных материалов под действием импульсов тока большой плотности : автореферат дис. кандидата физико-математических наук: 01.04.07. Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе. Ленинград, 1991. 17 с.

18. Кукса Л.В., Арзамаскова Л.М. Физико-механические свойства на микро- и макроуровнях однофазных и двухфазных поликристаллических материалов // Физика металлов и металловедение. 2000. Т. 90. № 1. С. 84-90.
19. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. М. : Машиностроение, 1980. 375 с.
20. Ломакин В.А. Влияние микронеоднородности структуры материалов на их механические свойства // Проблемы надежности в строит, механике. Вильнюс. 1968. С. 107-112.
21. Сергеев А.В. Разработка физико-механических моделей и методов расчета элементов конструкций из различных структурно-неоднородных материалов на основе применения метода конечных элементов : дис. канд. техн. наук: 05.23.17 Волгоград, 2006. 140 с.
22. Москвичев Е.В. Оценка трещиностойкости конструкций с учетом структурно-механической неоднородности сварных соединений : дис. кандидата технических наук: 01.02.06 [Место защиты: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН]. Красноярск, 2013. 102 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/537.
23. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М. : Изд-во стандартов, 1959. 40 с.
24. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М. : Машиностроение, 1979. 191 с. ил.
25. Барышев Е.Е. Механические свойства материалов : учебное электронное пособие. Екатеринбург, 2008.
26. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 328 с.
27. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. Пер. с англ. М. : «Металлургия», 1978. 256 с.
28. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 2: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. М. : Мир, 1990. 1016 с. ил.
29. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М. : Машиностроение, 1981. 272 с.

УДК 531.395

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф.

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, г. Москва

Композиционные материалы (КМ) широко применяются в авиации, ракето-, автомобиле-, машиностроении, металлургии, в химической и нефтехимической промышленности, медицине, ядерной энергетике, для изготовления спортивного снаряжения.

Композиционные материалы представляют собой многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов или тонкодисперсных частиц и др.

По структуре наполнителя КМ подразделяются на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями), дисперсноармированные или дисперсноупрочнен-