УДК 539.375: 621.763

С.И. Скипочка, д-р техн. наук, профессор,
Т.А. Паламарчук, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Н.Т. Бобро, магистр
(ИГТМ НАН Украины)
В.П. Куринной, д-р техн. наук, доцент
(ГВУЗ «НГУ»)

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.І. Скіпочка, д-р техн. наук, професор,
Т.А. Паламарчук, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,
М.Т. Бобро, магістр
(ІГТМ НАН України)
В.П. Курінний, д-р техн. наук, доцент
(ДВНЗ «НГУ»)

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ РІВНІВ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

S.I. Skipochka, D.Sc. (Tech.), Professor,
T.A. Palamarchuk, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,
N.T. Bobro, M.S (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)
V.P. Kurinnoy, D.Sc. (Tech.), Associate Professor
(SHEI “NMU”)

TO QUESTION OF DETERMINATION OF CRITICAL LEVELS LOSSES OF STABILITY OF COMPOSTE MATERIALS

Аннотация. Прочность хрупких материалов снижается с ростом абсолютных размеров тела и это, как правило, объясняют с позиции теории «слабейшего звена», т.е. повышением вероятности попадания в нагруженную зону достаточно опасного дефекта, снижающего реализацию прочности. Однако масштабный эффект следует также из предположения, что накопленная в объеме тела упругая энергия переходит в работу разрушения по некоторой поверхности. В результате рассмотрения и анализа особенностей структурно-неоднородных тел выявлены в качестве наиболее информативных параметров, характеризующих устойчивость различных композитных конструкций, следующие величины: критическое значение межслойных касательных напряжений, межслойная сдвиговая прочность при кручении, предел прочности при сжатии композитного прямоугольного образца, обобщенной критерий прочности А. К. Малмейстера, вероятность разрушения элемента структуры композитного материала, вероятность совместного разрушения двух произвольных элементов композитных материалов, критическое значение амплитуды волн напряжений, критическое значение скорости изменения напряжения, критическое значение градиента напряжений, критическое значение удельной упругой мощности.

Ключевые слова: композитные материалы, критерии устойчивости, прочность, разрушение.

Актуальность работы

Известно, что прочность хрупких материалов снижается с ростом абсолютных размеров тела и это, как правило, объясняют с позиции теории «слабейшего звена», т. е. повышением вероятности попадания в нагруженную зону достаточно опасного дефекта, снижающего реализацию прочности. Однако масштабный эффект следует также из предположения, что накопленная в объеме тела упругая энергия переходит в работу разрушения по некоторой поверхности. В [1] из анализа размерностей показано, что наличие в материале поверхностной энергии разрушения приводит к зависимости прочности от размера структурной ячейки как на квантомеханическом, так и на макроуровне для неоднородных материалов с гипотетическими дефектами.

Материалы и результаты исследования

Предположим, что вся накопленная упругая энергия затрачивается на разрушение, которое начнется, когда упругая энергия станет достаточной для совершения работы разрушения R. В действительности эта гипотеза $U = R$ есть лишь необходимое условие разрушения, которое дает нижнюю оценку прочности:

$$\sigma = \sqrt{2E\gamma / l}\,, \tag{1}$$

где E – модуль Юнга; γ – удельная работа разрушения; l – длина образца.

Пусть разрушение состоит в быстром разделении образца на две части; при этом площадь поверхности разрушения равна bh, а работа разрушения $R = \gamma bh$, где b – ширина образца; h – толщина образца.

Тот факт, что упругая энергия накапливается в теле и пропорциональна объему, а разрушение происходит по поверхности и работа разрушения пропорциональна площади сечения, приводит к неизбежной зависимости прочности от абсолютных размеров тела.

Интересные для практических приложений результаты могут быть получены при анализе с помощью энергетического критерия такого распространенного вида разрушения волокнистых композитов с полимерной матрицей, как расслоение.

При поперечном изгибе композитной балки по схеме, изображенной на рис. 1, прогиб $\delta = 0{,}25Pl^3/(Ebh^3)$, накопленная упругая энергия равна $U_0 = 2E\delta^2bh^3/l^3$, где P – нагрузка на образец. Считается, что расслоение произошло при постоянном прогибе за счет упругой энергии, накопленной в образце. Необходимо, чтобы разность между упругой энергией до U_0 и после U_1 расслоения была больше работы расслоения R. Расслоение может произойти по плоскости на расстоянии φh от нижнего края балки, где φ – угол наклона плоскости расслоения. При этом упругая энергия U_1 после расслоения пропорциональная $\varphi^3h^3 + (1-\varphi)^3h^3$ и из условия $\partial(U_0 - U_1)/\partial\varphi = 0$ следует, что энергетически наиболее «выгодно» расслоение посредине: $\varphi = 1/2$. Предположим, что расслоение происходит на m равных полос, тогда $U_0 - U_1 \sim h^3 - h^3/m^2$ и $R \sim m–1$. Максимум отношения высвобождения энергии к работе расслоения

$(U_0 - U_1)/R \sim (m+1)/m^2$ достигается при m =1 и это отношение убывает с ростом m, так как расслоение возможно лишь на две части [1].

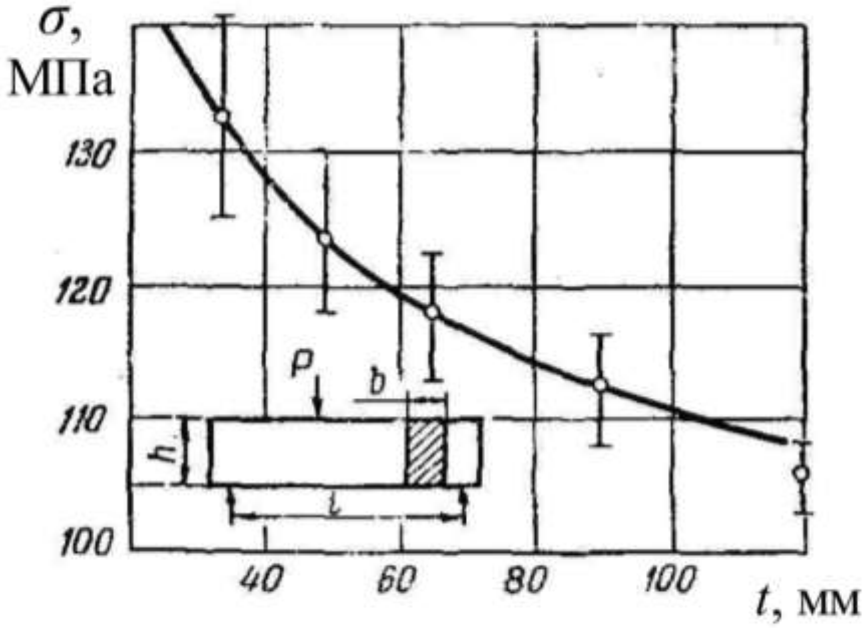

Рисунок 1 – Изменение изгибной прочности образцов от их длины

Используя выражения для U_0, U_1 и $R = \gamma bl$, находим зависимость нагрузки при расслоении от размеров тела $P = 4bh(^2/_3E\gamma h)^{1/2}/l$.

Обычно для оценки межслойной прочности композитов при поперечном изгибе используют критическое значение межслойных касательных напряжений, вычисляемое по формуле [2] $\tau = 3/4P/(bh)$. Таким образом

$$\tau = h/l\sqrt{6E\gamma/h} \qquad (2)$$

и межслойная прочность оказывается зависящей не только от отношения пролета l к высоте балки h, но и от абсолютного значения высоты (или длины) балки. При этом с ростом толщины h при постоянной длине межслойная прочность при изгибе должна расти, а при сохранении подобия с ростом толщины (и длины) прочность снижается.

При кручении слоистых композитов также может происходить расслоение, которое, как нетрудно показать по аналогии с изгибом, должно начинаться в среднем сечении и разделять пластину на две равные части.

Считаем, что прямоугольный образец длиной l, толщиной b и шириной a (a>b) расслоился посредине при постоянном погонном угле закручивания θ. Тогда уравнение баланса энергии принимает вид:

$$1/2M^2l/(GI) = 1/2M'^2l/(GI') + \gamma al; \qquad (3)$$

$$M = GI\theta; \quad M' = GI'\theta; \quad I = \beta(c)ab^3; \quad I' = 1/4\beta(2c)ab^3,$$

где $\beta(c)$ – табулированная функция [2]; G – модуль сдвига.

Материал предполагается для простоты изотропным, учет различия в модулях сдвига приводит лишь к изменению эффективного отношения $c = a/b$. Длина образца не влияет на прочность, если конечно, не учитывать влияния захватов.

Известно, что наибольшие значения касательных напряжений достигаются на серединах сторон сечения. На середине большой стороны a (см., например, [2]) $\tau_a = M/(\alpha ab^2)$, на середине меньшей стороны b межслойное напряжение $\tau_b = \eta\tau_a$; α и η – табулированные функции от c, которые при $c \to \infty$ быстро приближаются к своим предельным значениям $\alpha \to 1/3$, $\eta \to 0{,}743$; уже при $c > 6$ отличие от предельных значений не превышает 10 %, поэтому для достаточно вытянутых сечений можно пользоваться соответствующими пределами.

Из энергетического критерия (3) следует зависимость межслойной сдвиговой прочности при кручении τ_b от геометрических размеров образца (обычно эта прочность считается постоянной):

$$\tau_b = \{[\beta(c)\eta/\alpha]^2 2G\gamma/b[\beta(c)-\beta(2c)]\}^{1/2}. \quad (4)$$

Прочность при кручении слоистых материалов, согласно (4), зависит не только от отношения размеров сечения, но и убывает с ростом абсолютного значения толщины образца.

Для прочности прямоугольного композитного образца длины l при сжатии, когда разрушение происходит путем выщелкивания на всю длину крайнего слоя толщиной δ, получено выражение [3–5]:

$$\sigma = \pi^2 E\delta^2/[\mu l^2(1-\nu^2)] + [2E\gamma/(\delta(1-\nu^2))]^{1/2}, \quad (5)$$

где $\mu = 12$ для свободного опирания полоски; ν – коэффициент Пуассона.

Если бы расслоение могло происходить по любой плоскости, то из условия $\partial\sigma/\partial\delta = 0$ следовало бы $\sigma_{min} = \alpha E^{3/5}\cdot\gamma^{2/5}\cdot l^{-2/5}\cdot(1-\nu^2)^{-3/5}$, где $\alpha = 5/2\pi^{2/5}(2\mu)^{-1/5}$.

Однако расслоение, как правило, происходит по крайнему слою и формула (5) лучше согласуется с экспериментальной зависимостью прочности при сжатии от длины образца.

Таким образом, применение энергетического критерия расслоения позволяет не только описывать зависимость прочности от размеров элемента и учитывать масштабный эффект, но и устанавливать корреляцию прочностей при различных видах нагружения, когда происходит одинаковый механизм разрушения, так как формулы (2), (4) и (5) включают по сути один и тот же параметр прочности – удельную энергию расслоения γ, которая по порядку величины совпадает при различных типах развития расслоений. Наблюдаемое в экспериментах расхождение в значениях γ, например, для кручения и сжатия материалов, связано, с одной стороны, с чрезвычайным упрощением модели разрушения, а, с другой стороны, с тем, что расслоение при сжатии происходит по виду I нормального отрыва, а при кручении трещина расслоения развивается при комбинации продольного и поперечного сдвига (вид II и III).

Известно, что для определения вероятностных характеристик микроразрушения используется локальный структурный критерий прочности композитного материала [6]. Для однородных полимеров в 1966 г. А. К. Малмейстер предложил общий критерий прочности в виде полинома, содержащего тензоры прочности второго, четвертого, шестого и более высоких рангов, выражаемых через макроконстанты материала [7]:

$$\Omega^*(\sigma^*_{ij}, H^*_{ij}, H^*_{ijmn},...) = H^*_{\alpha\beta}\sigma^*_{\alpha\beta} + H^*_{\alpha\beta\gamma\delta}\sigma^*_{\alpha\beta}\sigma^*_{\gamma\delta} + H^*_{\alpha\beta\gamma\delta\rho\omega}\sigma^*_{\alpha\beta}\sigma^*_{\gamma\delta}\sigma^*_{\rho\omega} + ... = 1, \quad (6)$$

где H^*_{ij}, H^*_{ijmn}, … – тензоры макропрочности различных рангов, не зависящих от компонент макронапряжений σ^*_{ij}.

Для анизотропных материалов другой вид записи критерия макропрочности предложен И. И. Гольденблатом и В. А. Копновым [8]:

$$\left(H^*_{\alpha\beta}\sigma^*_{\alpha\beta}\right)^{a} + \left(H^*_{\alpha\beta\gamma\delta}\sigma^*_{\alpha\beta}\sigma^*_{\gamma\delta}\right)^{b} + \left(H^*_{\alpha\beta\gamma\delta\rho\omega}\sigma^*_{\alpha\beta}\sigma^*_{\gamma\delta}\sigma^*_{\rho\omega}\right)^{c} + ... = 1, \quad (7)$$

где a, b, c – безразмерные коэффициенты.

В последнее время выдвинут ряд новых критериев прочности, основанных на концепции накопления повреждений. За меру разрушения в этих критериях обычно принимают параметр повреждаемости ω, который при отсутствии повреждений ω = 0, а в момент макроразрушения ω = 1, т.е. 0 ≤ ω ≤ 1 [9]. Таким образом, критическая величина этого параметра в некоторой точке считается критерием разрушения

$$\omega(t) = 1. \quad (8)$$

Основной недостаток указанных выше критериев прочности при использовании их в механике композитов состоит в том, что критерии (6)–(8) явным образом не учитывают микроструктуру композита. Использование этих критериев на структурном уровне в рамках структурно-феноменологической модели композитов позволяет явным образом учитывать структуру материала. Для конкретности рассмотрим критерий (6), так как обобщение критериев прочности (7) и (8) на микронеоднородные среды производится аналогично. Тогда обобщенный критерий А. К. Малмейстера для композитных сред запишется

$$\Omega\left(\sigma_{ij}(\vec r), \Psi_{ij}(\vec r), \Psi_{ijmn}(\vec r), ...\right) = \Psi_{ij}(\vec r)\sigma_{ij}(\vec r) + \Psi_{ijmn}(\vec r)\sigma_{ij}(\vec r)\sigma_{mn}(\vec r) + \\ + \Psi_{ijmnkl}(\vec r)\sigma_{ij}(\vec r)\sigma_{mn}(\vec r)\sigma_{kl}(\vec r) + ... \quad (9)$$

где тензоры прочности $\Psi_{ij}(\bar{r})$, $\Psi_{ijmn}(\bar{r})$, … образуют случайные тензорные поля (вырожденные, локально-эргодические, квазилокально-эргодические [10], заданные на структуре.

Для двухкомпонентных композитов типа армированных пластиков, прочностные свойства структурных элементов которых отличаются незначительно (не более чем на один порядок), тензоры прочности могут быть описаны на структуре линейной моделью

$$\Psi_{ij}(\bar{r}) = \Psi_{ij}^{(1)}\chi(\bar{r}) + \Psi_{ij}^{(2)}[1-\chi(\bar{r})],$$
$$\Psi_{ijmn}(\bar{r}) = \Psi_{ijmn}^{(1)}\chi(\bar{r}) + \Psi_{ijmn}^{(2)}[1-\chi(\bar{r})].$$

Для эластомерных композитов, упругие и прочностные свойства которых отличаются на три-пять порядков и более, зависимость тензоров модулей упругости и прочности является нелинейной от объемной концентрации включений [11]. На основании гипотезы о том, что закон изменения тензоров прочности эластомерного композита подобен изменению тензоров модулей упругости включений [11], в работе [6] получены уравнения:

$$\Psi_{ij}(\bar{r}) = \Psi_{ij}^{(2)}\frac{[1+\chi'(\bar{r})]}{(1-p)^2}; \quad \Psi_{ijmn}(\bar{r}) = \Psi_{ijmn}^{(2)}\frac{[1+\chi'(\bar{r})]}{(1-p)^2}, \tag{10}$$

где Ψ_{ij}^{2}, Ψ_{ijmn}^{2} – тензоры прочности связующего.

Тогда вероятность разрушения элемента структуры запишется в виде

$$p_1^{II}(\bar{r}) = 1 - P\{\Omega(\bar{r})<1\} = 1 - P\{\Psi_{ij}(\bar{r})\sigma_{ij}(\bar{r}) + \Psi_{ijmn}(\bar{r})\sigma_{ij}(\bar{r})\sigma_{mn}(\bar{r}) + \ldots < 1\}. \tag{11}$$

Аналогичным образом вероятность совместного разрушения двух произвольных элементов определяется как

$$p_2^{II}(\bar{r},\bar{r}_1) = P\{\Omega(\bar{r})>1, \Omega(\bar{r}_1)>1\}. \tag{12}$$

и т. д.

В работе [6] приведен также расчет вероятности микроразушения элемента конструкции при более простом критерии разрушения. Условие разрушения макроструктуры изотропного материала, обладающего различным сопротивлением растяжению и сжатию, примем в виде обобщенного критерия П. П. Баландина, вытекающего из (9):

$$\Omega(\bar{r}) = \sigma_u^2(\bar{r}) + \Psi_1(\bar{r})\sigma(\bar{r}) - \Psi_2(\bar{r}) = 0, \tag{13}$$

где $\Psi_1(\bar{r})$ и $\Psi_2(\bar{r})$ – материальные случайные функции координат, заданные на структуре следующим образом:

$$\Psi_i(\bar{r}) = \Psi_i(0)\frac{1+\chi'(\bar{r})}{(1-p)^2}; \quad (i=1,2), \tag{14}$$

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{2}(3\sigma_{\alpha\beta}\sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{\alpha\alpha}\sigma_{\beta\beta}), \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_{\alpha\alpha} \;–$$

соответственно интенсивность случайных структурных напряжений и средние структурные напряжения; $\Psi_i(0)$ – параметры, определяемые из экспериментов на растяжение и сжатие однородных образцов.

Вычислим теперь вероятность микроразрушения $p^{\mathrm{II}}(\bar{r})$. Очевидно, что $\Omega(\bar{r})$ – случайная функция детерминированного радиуса-вектора, зависящего в каждой точке от действующих структурных напряжений, прочностных свойств микронеоднородной среды и концентрации наполнителя. Зная вид функции (14), можно вычислить одноточечные центральные моменты случайной функции $\left\langle (\Omega)^{n} \right\rangle$, а по ним, используя алгоритм восстановления плотности распределения по ряду Эджворта [12], получить плотности распределения по $f(\Omega)$ величины Ω. Вероятность, с которой выполняется неравенство $\Omega(\bar{r}) \geq 1$, будет равна вероятности микроразрушения и определяется как площадь под кривой $f(\Omega)$ при $\Omega \geq 1$. Таким же путем вычисляются вероятности $p_2^{\mathrm{II}}(\bar{r}, \bar{r}_1)$, $p_3^{\mathrm{II}}(\bar{r}, \bar{r}_1, \bar{r}_2)$ и т.д. Приведенный выше метод позволяет вычислять вероятностные характеристики микроразрушения в любой точке конструкции по известным структурным напряжениям и прочностным свойствам среды.

При исследовании условий разупрочнения трехмерных композитных материалов в поле напряжений, возникающем при взрыве, следует отметить, что когда заданы минимальные размеры частиц, на которые необходимо разрушить вещество, то амплитуда волн напряжений (УВ) σ, скорость изменения напряжений $\partial\sigma/\partial t$, их градиент $\partial\sigma_i/\partial r_i$, длительность напряженного состояния Δt и скорость потока мощности $\dfrac{\partial^4 W}{(\partial x_i)^3 \partial t}$ должны удовлетворять неравенствам [13]:

$$\sqrt{\frac{E\gamma}{\pi\ell_2}} > \sigma > \sqrt{\frac{E\gamma}{\pi\ell_1}};$$

$$\frac{\sigma_{kp}(\ell_2)}{\Delta t} > \frac{\partial\sigma}{\partial t} > \frac{\sigma_{kp}(\ell_1)}{\Delta t};$$

$$\frac{r_2}{C_\ell} > \Delta t > \frac{r_1}{C_\ell};$$

$$\frac{\sigma_{kp}(\ell_2)}{r_1} > \frac{\partial\sigma_i}{\partial r_i} > \frac{\sigma_{kp}(\ell_1)}{r_2};$$

$$\frac{\pi\sigma_{kp}^2(\ell_2)\ell_2 C_\ell^2 N}{E} > \frac{\partial^4 W}{\partial x_i^3 \partial t} > \frac{\pi\sigma_{kp}^2(\ell_1)\ell_1 C_\ell^2 N}{E},$$

где σ − напряжение, при котором происходит рост трещины длиной $\ell_1 < \ell < \ell_2$; $\sigma_{kp}(\ell_i)$ − напряжение, при котором происходит рост трещин длиной ℓ_i (i = =1,2); E − модуль упругости породы; γ − работа образования единицы площади новой поверхности; r – расстояние между трещинами ($r_1 < r < r_2$); N – концентрация трещин длиной ℓ в слое композитного материала.

Приведенные в настоящей статье критериальные значения физических величин, характеризующих потерю устойчивости композитных материалов, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Критерии потери устойчивости композитных материалов

Критерий прочности	Уравнение	Оцениваемый Параметр
1	2	3
Критическое значение межслойных касательных напряжений	$\tau = h / l \sqrt{6E\gamma / h}$	Межслойная прочность композитов при поперечном изгибе
Межслойная сдвиговая прочность при кручении	$\tau_b = \left[2\beta(\eta/\alpha)2G\gamma/b\right]\left[\beta(c)-\beta(2c)\right]^{1/2}$	Прочность при кручении слоистых материалов
Предел прочности при сжатии композитного прямоугольного образца	$\sigma = \pi^2 E\delta^2 / [\mu l^2 (1-\nu^2)] + [2E\gamma/(\delta(1-\nu^2))]^{1/2}$	Предел прочности
Обобщенной критерий прочности А. К. Малмейстера	$\Omega(\sigma_{ij}, \Psi_{ij}, \Psi_{ijmn}, \ldots) = \Psi_{ij}(\sigma_{ij}) + \Psi_{ijmn}(\sigma_{ij})(\sigma_{mn}) + \Psi_{ijmnkl}(\sigma_{ij})(\sigma_{mn})(\sigma_{kl}) + \ldots$	Прочность композитных материалов, учитывающая структуру материала
Вероятность разрушения элемента структуры композитного материала	$p_1^{\mathrm{II}}(r) = 1 - P(\Phi(r) < 1) = 1 - P(\Psi_{ij}(\sigma_{ij}) + \Psi_{ijmn}(\sigma_{ij})(\sigma_{mn}) + \ldots < 1)$	Прочность элемента структуры композитного материала
Вероятность совместного разрушения двух произвольных элементов композитных материалов	$p_2^{\mathrm{II}}(r, \bar{r}_1) = P(\Omega(r) > 1, \Omega(r_1) > 1)$	Общая прочность двух произвольных элементов композитных материалов
Критическое значение амплитуды волн напряжений	$\sqrt{\dfrac{E\gamma}{\pi\ell_2}} > \sigma > \sqrt{\dfrac{E\gamma}{\pi\ell_1}}$	Значение амплитуды волн напряжений, при котором происходит рост трещин, длиной $\ell_1 < \ell < \ell_2$

Продолжение табл. 1

1	2	3
Критическое значение скорости изменения напряжения	$\frac{\sigma_{kp}(\ell_2)}{\Delta t} > \frac{\partial\sigma}{\partial t} > \frac{\sigma_{kp}(\ell_1)}{\Delta t}$	Значение скорости изменения напряжений, при котором происходит рост трещин длиной $\ell_1 < \ell < \ell_2$
Критическое значение градиента напряжений	$\frac{\sigma_{kp}(\ell_2)}{r_1} > \frac{\partial\sigma_i}{\partial r_i} > \frac{\sigma_{kp}(\ell_1)}{r_2}$	Значение градиента напряжений, при котором происходит рост трещин длиной $\ell_1 < \ell < \ell_2$
Критическое значение удельной упругой мощности	$\frac{\pi\sigma_{kp}^2(\ell_2)\ell_2 C_\ell^2 N}{E} > \frac{\partial^4 W}{\partial x_i^3 \partial t} > \frac{\pi\sigma_{kp}^2(\ell_1)\ell_1 C_\ell^2 N}{E}$	Значение удельной упругой мощности, при которой происходит рост трещин длиной $\ell_1 < \ell < \ell_2$

Выводы

В результате рассмотрения и анализа особенностей структурно-неоднородных тел выявлены в качестве наиболее информативных параметров, характеризующих устойчивость различных композитных конструкций, следующие величины: критическое значение межслойных касательных напряжений, межслойная сдвиговая прочность при кручении, предел прочности при сжатии композитного прямоугольного образца, обобщенной критерий прочности А. К. Малмейстера, вероятность разрушения элемента структуры композитного материала, вероятность совместного разрушения двух произвольных элементов композитных материалов, критическое значение амплитуды волн напряжений, критическое значение скорости изменения напряжения, критическое значение градиента напряжений, критическое значение удельной упругой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полилов, А. Н. Объяснение масштабного эффекта на основе энергетического критерия разрушения / А. Н. Полилов // Механика твердого тела. – 1984. – №1. – С. 106–110.

2. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 455 с.

3. Качанов, Л. М. Разрушение композитных материалов путем расслоения / Л. М. Качанов // Механика полимеров. – 1976. – №5. – С. 918–922.

4. Слепян, Л. И. Механика трещин / Л. И. Слепян. – Л.: Судостроение, 1981. – 295 с.

5. Полилов, А. Н. Развитие расслоения при сжатии композитов / А. Н. Полилов, Ю. Н. Работнов // Изв. АН СССР. МТТ. – 1983. – №4. – С. 166–171.

6. Соколкин, Ю. В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел / Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. – М.: Наука, 1984. – 114 с.

7. Малмейстер, А К. Сопротивление полимерных и композитных материалов / А К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетерс. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.

8. Гольденблат, И. И. Длительная прочность и машиностроение / И. И. Гольденблат, В. Л. Бажанов, В. А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1877. – 248 с.

9. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

10. Мельников, С. В. Свойства случайных полей применительно к задачам механики стохастически неоднородных сред / С. В. Мельников, Ю. В. Соколкин // Упругое и вязкоупругое поведение материалов и конструкций. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1981. – С. 113–118.

11. Соколкин, Ю. В. О методе расчета структурных напряжений в эластомерных композитах / Ю. В. Соколкин, Л. И. Миронович // Краевые задачи теории упругости и вязкоупругости. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. – С. 3–19.

12. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. М.: Мир, 1975. – 648 с.

13. Курінний, В. П. Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом / Курінний В.П. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 158 с.

REFERENCES

1. Polilov, A. N. (1984), “The explanation of scale effect on the base of energy criterion of the distraction”, *Mechanics of solid texture*, no.1, pp. 106-110.

2. Rabotnov, JU.N. (1962), *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials], Fizmatgiz, Moscow, USSR.

3. Kachanov, L.M. (1976), “The distraction of the composite materials by segregation”, *Mechanics of polymers*, no.5, pp. 918-922.

4. Slepjan, L.I. (1981) *Mechanika trecshin* [Mechanic of cracks], Sudostroeniye, Leningrad, USSR.

5. Polilov, A. N. (1983), “The evolution of the segregation at compression of composites”, *Proceedings of the AS USSR,* s. *Mechanics of solid texture*, no.4, pp. 166-171.

6. Sokolkin, JU. V. and Tashkinov, A. A. (1984), *Mechanika deformirovanija i razrushenija strukturno-neodnorodnykh tel* [Mechanic of deformation and destruction of structural-inhomogeneous bodes], Nauka, Moscow, USSR.

7. Malmejster, A.K., Tamuzsh, V.P. and Teters, G.A. (1980), *Soprotivlenie polymernykh i kompozitnykh materialov* [Resistance of polymeric and composite materials], Zinatne, Piga, Latvia.

8. Goldenblat, I.I., Bazhanov, V.L. and Kopnov, V.A. (1987), *Dlitelnaja prochnost i mashinostroenie* [Duration strength and machine-building], Mashinostroenie, Moscow, USSR.

9. Rabotnov, JU.N. (1966), *Polzuchest elementov konstruktsiy* [Creep of constructions elements], Nauka, Moscow, USSR.

10. Melnikov, S.V. and Sokolkin, JU.V. (1981), “The properties fortuity fields conformably to problem of the stochastic inhomogeneous mediums”, *Uprugoe i vyazkouprugoe povedenie materialov i constructsy*, Sverdlovsk, USSR, pp. 113-118.

11. Sokolkin, JU. V. and Mironovich, L.I., (1990), “About the method of the calculation of structural stress elastomeric composites”, *Kraevye zadachi teorii Regional tasks uprugosti i vyazkouprugosti,* Sverdlovsk, USSR, pp. 3-19.

12. Kramer, G. (1975), *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical statistic methods], Mir, Moscow, USSR.

13. Kurinnoy, V.P. (2009), *Fizichni aspekty ruynuvannia girskikh porid vybukhom* [Physical aspects of rocks destruction by the explosion], NGU, Dnipropetrovsk, Ukraine.

Об авторах

Скипочка Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, skipochka@ukr.net

Паламарчук Татьяна Андреевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, tp208_2008@ukr.net

Бобро Николай Трофимович, магистр, ведущий специалист в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ru

Куринной Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» Украины (ГВУЗ «НГУ» Украины), Днепропетровск, Украина, nmu@nmu.org.ua

About the authors

Skipochka Sergey Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, skipochka@ukr.net

Palamarchuk Tatyana Andreevna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, tp208_2008@ukr.net

Bobro Nikolay Trofimovich, Master of Science, Principal Specialist in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

Kurinnoy Vladimir Pavlovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Associate Professor, Professor of Physics Department, State Higher Educational Establishment «The National Mining University» of Ukraine (SHEE «NMU» Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, nmu@nmu.org.ua

Анотація. Міцність крихких матеріалів знижується із зростанням абсолютних розмірів тіла і це, як правило, пояснюють з позиції теорії «найслабкішої ланки», тобто підвищенням вірогідності попадання в навантажену зону достатньо небезпечного дефекту, що знижує реалізацію міцності. Проте масштабний ефект випливає також з припущення, що накопичена в об'ємі тіла пружна енергія переходить в роботу руйнування по деякій поверхні. В результаті розгляду і аналізу особливостей структурно-неоднорідних тіл виявлено в якості найбільш інформативних параметрів, що характеризують стійкість різних композитних конструкцій, наступні величини: критичне значення міжшарових дотичних напруг, міжшарова зсувна міцність при крученні, межа міцності при стисненні композитного прямокутного зразка, узагальнений критерій міцності А. К. Малмейстера, вірогідність руйнування елемента структури композитного матеріалу, вірогідність сумісного руйнування двох довільних елементів композитних матеріалів, критичне значення амплітуди хвиль напружень, критичне значення швидкості зміни напружень, критичне значення градієнта напружень, критичне значення питомої пружної потужності.

Ключові слова: композитні матеріали, критерії стійкості, міцність, руйнування.

Abstract. Strength of fragile materials is reduced with increasing absolute sizes of a body; usually it is explained by the theory of «the weakest link», i.e. by increased probability of dangerous defect occurred in the loaded area resulting in the reduced strength. At the same time, a scale effect can also be explained by an assumption that the accumulated in the volume of body elastic energy transfers to the failure energy on a certain surface. Basing on studying and analysis of properties of structurally heterogeneous bodies, the following parameters were specified as the most informing ones, which can characterize stability of different composite structures: critical value of interlaminar tangent strength; interlaminar shear strength at twisting; ultimate compression strength of the right-angled specimens; the A.K. Malmeyster generalized criterion of strength; probability of structural fracture of composite material elements; probability of joint destruction of two random elements in the composite materials; critical value of stress wave amplitudes; critical value of stress change speed; critical value of stress gradient; and critical value of specific elastic power.

Keywords: composite materials, criteria of stability, strength, destruction, fracture.

Статья поступила в редакцию 25.12. 2013

Статья рекомендована к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым

УДК 622.647:622.867

В.Ф. Монастырский, д-р техн. наук, профессор,
Р.В. Кирия, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Д.А. Номеровский, аспирант,
С.Р. Ванин., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ РАЗГРУЗОЧНОЙ ТЕЛЕЖКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО КОНВЕЙЕРА

В.Ф. Монастирський, д-р техн. наук, професор,
Р.В. Кірія, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Д.А. Номеровський, аспірант,
С.Р. Ванін, магістр
(ІГТМ НАН України)

ПОДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНІ КОЛИВАННЯ ПРУЖНОЇ СИСТЕМИ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОГО ВІЗКА РОЗПОДІЛЬНОГО КОНВЕЄРА

V.F. Monastyrsky, D.Sc. (Tech.), Professor,
R.V. Kiriya, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
D.A. Nomerovsky, Doctoral Student,
S.R. Vanin, M.S (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

LONGITUDINAL-TRANSVERSE VIBRATIONS OF ELASTIC SYSTEM DISCHARGE CAR DISTRIBUTION PIPELINE

Аннотация. В настоящей статье приведены результаты исследований поперечно-продольных колебаний упругой системы лента – упругое основание загрузочной секции распределительного конвейера под воздействием внешнего нагружения равномерно-распределенной нагрузкой и крупными кусками с постоянными и переменными массами и периодами воздействия. Рассмотрены вопросы моделирования внешнего воздействия потоком насыпного груза, жесткости упругой системы загрузочной секции и статического ее расчета при распределенной и точечной нагрузке. Получены закономерности изменения жесткости системы от натяжения ленты и шага расстановки роликоопор. Обоснованы расчетная схема для определения поперечно-продольных колебаний системы под внешним воздействием и система уравнений с начальными и граничными условиями, которая решалась методом Рунге-Кутта четвертого порядка с применением программного пакета Maple. Выполнены анализ и обобщение полученных результатов.

Установлено, что продольные колебания уменьшают поперечные. Высокочастотная возмущающая сила не вызывает ощутимых колебаний в низкочастотной упругой системе, так как она не успевает отзываться на весьма быстрые изменения силы. При случайном нагружении амплитуда колебаний достигает 0,1–0,14 м и движение системы, практически, происходит как при изменении возмущающей силы по гармоническому закону. При низких частотах система находится вблизи резонанса. Однако амплитуда колебаний имеет конечную величину из-за значительных диссипативных сил в упругой системе.

Ключевые слова: крупный кусок, период, масса, упругая система, колебания, диссипативные силы, амплитудно-частотная характеристика.