

67. Надежность в технике. Научно-технические, экономические и правовые аспекты надежности: Методическое пособие / В.В. Болотин, А.П. Гусенков, С.В. Нефедов, А.И. Тананов; под ред. В.В. Болотина. – М.: МНТК «Надежность машин», 1993. – 253 с.
68. Крышевич О.В., Переездчиков И.В. Модель управления опасностями системы человек – машина – среда // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение, 1998. – № 2. – С. 32-43.
69. Переездчиков И.В., Крышевич О.В. Надежность технических систем и техногенный риск. Ч. 1: Управление риском системы человек – машина – среда. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.

УДК 539.3

Кобец А.С., Науменко Н.Н., Дырда В.И.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО БЛОКА ПРИ СЖАТИИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

Розглядається напружено-деформований стан гумометалевого призматичного блоку при монофазному деформуванню стиску вертикальним навантаженням.

STRESS-STRAIN STATE OF A RUBBER-METALLIC BLOCK AT COMPRESSION BY STATIC LOAD

Stress-strain state of rubber-metallic prismatic block at monophase compression deforming by vertical load is considered.

Ранее [1] при исследовании напряженно-деформированного состояния длинного резинометаллического блока под действием сжимающей нагрузки задача сводилась к случаю плоской деформации. Очевидно, что для блоков, габаритные размеры которых одного порядка, такой подход может давать некоторую погрешность. При расчете таких блоков оставим в силе предположения о том, что горизонтальные сечения блока при деформировании остаются горизонтальными; металлические составляющие блока – жесткие, недеформируемые; точки находящиеся на вертикальной линии при нагружении остаются на параболе, а резина считается несжимаемой. С учетом этих допущений для перемещений U, V, W соответственно вдоль координатных осей x, y, z , которые являются осями симметрии блока (рис. 1), принимаются следующие выражения

$$U(x, y, z) = U_0(x) \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right); \quad V(x, y, z) = V_0(y) \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right); \quad (1)$$

$$W(x, y, z) = W_0(z),$$

где h – высота недеформированного блока (рис. 1).

При определении функций U, V, W воспользуемся условием несжимаемости [2]:

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x}$; $\varepsilon_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y}$; $\varepsilon_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z}$.

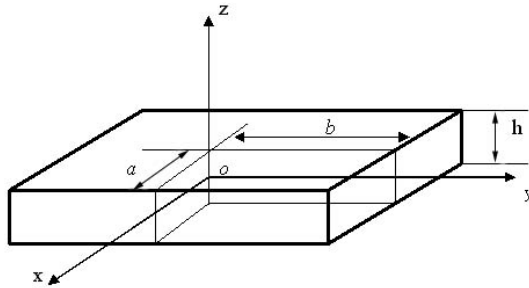


Рис. 1 – Расчетная схема

Из выражения (2) с учетом формул (1) следует

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{dU_0}{dx} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \frac{dV_0}{dy} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \frac{dW_0}{dz} = 0, \quad (3)$$

откуда

$$\begin{aligned} W_0 &= -\int_0^{\frac{h}{2}} \frac{dU_0}{dx} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) dz - \int_0^{\frac{h}{2}} \frac{dV_0}{dy} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) dz = -\frac{dU_0}{dx} \left(z - \frac{4z^3}{3h^2}\right) \Bigg|_0^{\frac{h}{2}} - \frac{dV_0}{dy} \left(z - \frac{4z^3}{3h^2}\right) \Bigg|_0^{\frac{h}{2}} = \\ &= -\frac{dU_0}{dx} \left(\frac{h}{2} - \frac{4h^3}{3 \cdot 8h^2}\right) - \frac{dV_0}{dy} \left(\frac{h}{2} - \frac{4h^3}{3 \cdot 8h^2}\right) = -\frac{h}{3} \left(\frac{dU_0}{dx} + \frac{dV_0}{dy}\right) = -\frac{f}{2} \end{aligned}$$

или

$$\frac{dU_0}{dx} + \frac{dV_0}{dy} = \frac{3f}{2h} = \frac{3}{2} \varepsilon, \quad (4)$$

где f – степень сжатия блока;

ε – относительное удлинение.

Учитывая, что $U_0(0) = 0$ и $V_0(0) = 0$, из выражения (4) получим

$$U_0 = Ax; \quad V_0 = By, \quad (5)$$

и $A + B = \frac{3}{2} \varepsilon$.

Принимая $A = C_U \varepsilon$; $B = C_V \varepsilon$, для перемещений U, V, W получим

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= C_U \varepsilon x \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right); \\ V(x, y, z) &= C_V \varepsilon y \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right); \\ W(x, y, z) &= -\frac{3}{2} \varepsilon \left(1 - \frac{4z^3}{3h^2}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Анализируя распределение напряжений при сжатии блока, воспользуемся известными соотношениями [2] для касательных напряжений

$$\tau_{xz} = G \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad \tau_{xy} = G \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right); \quad \tau_{yz} = G \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right),$$

где G – модуль сдвига.

С учетом выражений (6) отсюда следует

$$\tau_{xz} = -6G \frac{\varepsilon}{h^2} xz; \quad \tau_{yz} = -6G \frac{\varepsilon}{h^2} yz; \quad \tau_{xy} = 0. \quad (7)$$

К нормальным напряжениям можно перейти, воспользовавшись дифференциальными уравнениями равновесия элементарного объема, которые в случае отсутствия объемных сил имеют вид [2]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Из этих уравнений нетрудно получить

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial x} = -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 8C_U \varepsilon G \frac{x}{h^2}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial y} = -\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 8C_V \varepsilon G \frac{z}{h^2}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_z}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_z}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = 12\varepsilon G \frac{z}{h^2}. \quad (11)$$

Отсюда следует

$$\sigma_x = 4C_U \varepsilon G \frac{x^2}{h^2} + \sigma_x(y) + \sigma_x(z) + C_1; \quad (12)$$

$$\sigma_y = 4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \sigma(y) + \sigma_y(z) + C_2; \quad (13)$$

$$\sigma_z = 6\varepsilon G \frac{z^2}{h^2} + \sigma_z(x) + \sigma(y) + C_3. \quad (14)$$

Для окончательного определения напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ воспользуемся законом Гука [2]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \quad (15)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; \quad (16)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad (17)$$

где E – модуль упругости I рода;

μ – коэффициент Пуассона.

Учитывая, что $\varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{3}{2} \varepsilon \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right)$ и $E=3G$ для $\mu=0,5$, из формулы

(17) получим

$$\sigma_z = -\frac{3}{2} \varepsilon E \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \mu(\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{9}{2} G \varepsilon \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \mu(\sigma_x + \sigma_y). \quad (18)$$

С учетом выражений (12) и (13) для σ_z получим

$$\begin{aligned} \sigma_z = 6\varepsilon G \frac{z^2}{h^2} + 12\varepsilon G \frac{z^2}{h^2} - \frac{9}{2} G \varepsilon + \mu \left[3\varepsilon G \frac{x^2}{h^2} + \sigma_x(y) + \sigma_x(z) + C_1 + \right. \\ \left. + 3\varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \sigma_y(x) + \sigma_y(z) + C_2 \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Считая, что $\sigma_x(z) + \sigma_y(z) = -24G\varepsilon \frac{z^2}{h^2}$ при $\mu=0,5$, получим

$$\begin{aligned} \sigma_z = 6\varepsilon G \frac{z^2}{h^2} + 2C_U G \varepsilon \frac{x^2}{h^2} + 2C_V G \varepsilon \frac{y^2}{h^2} + 0,5\sigma_x(y) + 0,5\sigma_y(x) + 0,5C_1 + \\ + 0,5C_2 - \frac{9}{2} G \varepsilon. \end{aligned} \quad (20)$$

Учитывая, что $\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{3}{4} \varepsilon \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right)$, из формулы (16) имеем

$$\sigma_x = C_U \varepsilon E \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \mu(\sigma_y + \sigma_z) = 3C_U \varepsilon G \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \mu(\sigma_y + \sigma_z). \quad (21)$$

Аналогично

$$\sigma_y = 3C_V \varepsilon G \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) + \mu(\sigma_x + \sigma_z). \quad (22)$$

Для определения $\sigma_x(y)$ воспользуемся формулой (21), в которую подставим выражения σ_y и σ_z из выражений (13) и (14)

$$\sigma_x = 3C_U \varepsilon G \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right) + \mu \left(4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \sigma_y(x) + \sigma_y(z) + C_2 + \right. \\ \left. + 6\varepsilon G \frac{z^2}{h^2} + \sigma_z(x) \sigma_z(y) + C_3 \right), \quad (23)$$

откуда

$$\sigma_x(y) = \mu \left[4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \sigma_z(y) \right].$$

На основании формулы (19)

$$\sigma_z(y) = \mu \left[4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \sigma_x(y) \right],$$

тогда

$$\sigma_x(y) = \mu \left\{ 4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \mu \left[4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + \sigma_x(y) \right] \right\}$$

или

$$\sigma_x(y)(1 - \mu^2) = \mu(1 + \mu) 4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2}.$$

Окончательно, для $\mu = 0,5$

$$\sigma_x(y) = 4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2}. \quad (24)$$

Для определения $\sigma_y(x)$ воспользуемся формулой (22), в которую σ_x и σ_z подставим из выражений (12) и (14)

$$\sigma_y = 3C_V G \varepsilon \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right) + \mu \left[4C_U \varepsilon G \frac{x^2}{h^2} + \sigma_x(y) + \sigma_x(z) + C_1 + \right. \\ \left. + 6\varepsilon G \frac{z^2}{h^2} + \sigma_z(x) + \sigma_z(y) + C_3 \right]. \quad (25)$$

Отсюда

$$\sigma_y(x) = \mu \left[4C_U \varepsilon G \frac{x^2}{h^2} + \sigma_z(x) \right].$$

Из формулы (19) находим

$$\sigma_z(x) = 4C_U G \varepsilon \frac{x^2}{h^2}. \quad (26)$$

Тогда для $\sigma_y(x)$, принимая $\mu = 0,5$, получим

$$\sigma_y(x) = 4C_U G \varepsilon \frac{x^2}{h^2}. \quad (27)$$

Таким образом, вместо выражения (20) для σ_z получим

$$\sigma_z = 6G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} + 4C_U G\varepsilon \frac{x^2}{h^2} + 4C_V G\varepsilon \frac{y^2}{h^2} - \frac{9}{2} G\varepsilon + 0,5C_1 + 0,5C_2. \quad (28)$$

Из формулы (23) следует, что

$$\sigma_x(z) = -12C_U G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} + \frac{1}{2} \sigma_y(z) + 3G\varepsilon \frac{z^2}{h^2}.$$

Если

$$\sigma_y(z) = -24G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} - \sigma_x(z),$$

то

$$\sigma_x(z) + \frac{1}{2} \sigma_x(z) = -12C_U G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} - 12G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} + 3G\varepsilon \frac{z^2}{h^2},$$

или

$$\sigma_x(z) = -G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} (8C_U + 6). \quad (29)$$

Аналогично

$$\sigma_y(z) = -G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} (8C_V + 6). \quad (30)$$

Подставляя выражения (24) и (29) в формулу (12), для напряжения σ_x получим

$$\sigma_x = 4C_U \varepsilon G \frac{x^2}{h^2} + 4C_V G\varepsilon \frac{y^2}{h^2} - (8C_U + 6) G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} + C_1. \quad (31)$$

Подставляя выражения (27) и (30) в формулу (13), для σ_y получим

$$\sigma_y = 4C_V \varepsilon G \frac{y^2}{h^2} + 4C_U \varepsilon G \frac{x^2}{h^2} - (8C_V + 6) G\varepsilon \frac{z^2}{h^2} + C_2. \quad (32)$$

Для определения коэффициентов C_U и C_V воспользуемся формулами (15) и (16)

$$\varepsilon_x = C_U \varepsilon \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right) = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z) \right].$$

Подставляя сюда выражения для напряжений и учитывая, что $C_U + C_V = 1,5$, получим

$$C_U = \frac{3}{4} + \frac{C_1 + C_2}{4G\varepsilon}; \quad C_V = \frac{3}{4} - \frac{C_1 + C_2}{4G\varepsilon}.$$

Построенные таким образом выражения для напряжений удовлетворяют и уравнениям равновесия (8) и закону Гука (15)-(17). После установления постоянных интегрирования из граничных условий для $x = a$ и $y = b$ относительная

деформация блока ε может быть определена по известной сжимающей нагрузке Q для $z = h/2$

$$\int_{-a}^a \int_{-b}^b \sigma_z(x, y, h/2) dx dy = -Q,$$

где $\sigma_z(x, y, z)$ имеет вид (28).

После определения коэффициента ε выражения для $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ окончательно устанавливаются и совместно с выражениями для деформаций (6) составляют представление о напряженно-деформированном состоянии резинометаллического блока, позволяя его проектирование или проверку на прочность при нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деформирование резиновой опоры с неизменяемыми контактными гранями вертикальной нагрузкой / Кобец А.С., Дырда В.И., Науменко Н.Н. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАНУ. – Днепрпетровск. – 2007. – Вып 70. – С. 52-56.
2. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости. – М.: Физматгиз, 1959. – 364 с.

УДК 629.4.016.15

Кобец А.С., Бутенко В.Г., Дырда В.И., Деркач А.Д.,
Хлыстун А.

ВЛИЯНИЕ ЭТАНОЛА ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Досліджено вплив біоетанолу на характеристики бензинового двигуна «Volkswagen».

INFLUENCE OF ETHANOL IN A FUEL MIX ON CHARACTERISTICS OF THE PETROL ENGINE

Influence of bioethanol on characteristics of the «Volkswagen» petrol engine is investigated.

Постановка проблемы. Биоэтанол относится к нетрадиционным видам моторного топлива. Первые опыты его применения относятся к концу XIX века; уже в начале XX века его вытеснило более дешевое минеральное топливо (в основном, за счет усовершенствования механизма крекинга нефти). Возврат к биоэтанолю обусловлен целым рядом причин: резким повышением цен на нефть; неудовлетворительным состоянием экологии; желанием ряда стран приобрести независимость от энергоносителей других государств; глобальным потеплением и т.д. Несмотря на достаточно хорошую изученность этанола, применение биоэтанола в современных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) исследовано совершенно недостаточно. Настоящая статья является продолжением работ в этой области [1, 2]; в ней на основе экспериментальных исследований излагаются результаты влияния этанола (в основном смеси этанола и бензина) на характеристики ДВС.

Анализ исследований. Проблема использования биоэтанола в современных ДВС имеет следующие аспекты: технологические, экономические, экологи-