

ИЗГИБНАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

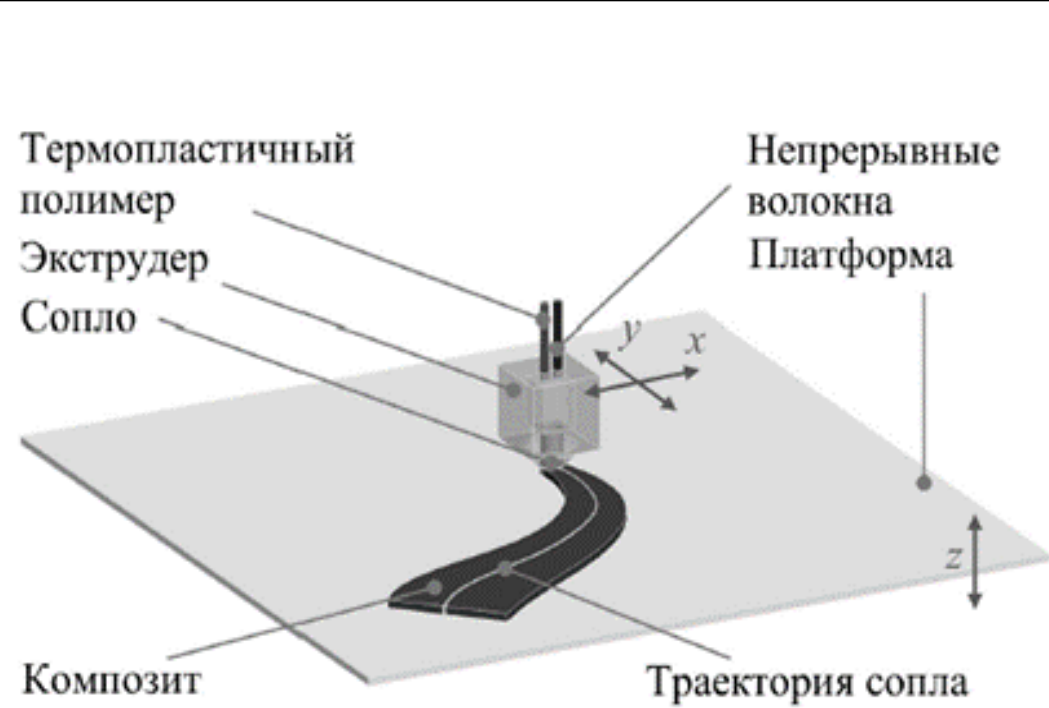
Волкова О.Ю., Власов Д.Д.

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

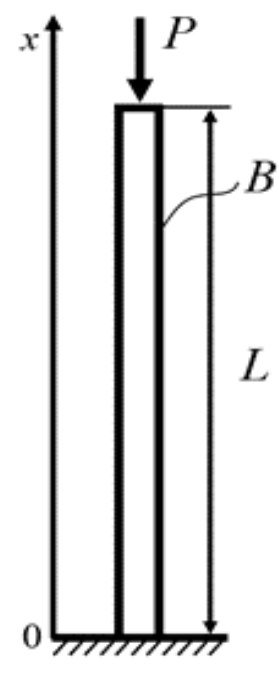
Аннотация

Рассмотрена задача о повышении критической силы при изгибной потере устойчивости композитных стержней за счет непрерывного изменения их изгибной жесткости. Переменная изгибная жесткость задается локальным варьированием объемной доли армирующего наполнителя, что возможно при использовании композитных аддитивных технологий. При этом форма, вес и габариты стержня остаются неизменными. Для нахождения критической силы для стержня переменной жесткости используется численный метод начальных параметров, который был усовершенствован для учета низкой межслойной жесткости полимерных композитов. Закон изменения модуля сдвига по длине стержня за счет изменения объемной доли наполнителя определяется с помощью модели Чамиса для расчета эффективных свойств материала.

Постановка задачи



Аддитивные композитные технологии



Модель стержня, сжатого продольной силой

Уравнение изогнутой оси сжатого стержня с переменной жесткостью

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(B(x) \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + P \frac{d^2 w}{dx^2} = 0$$

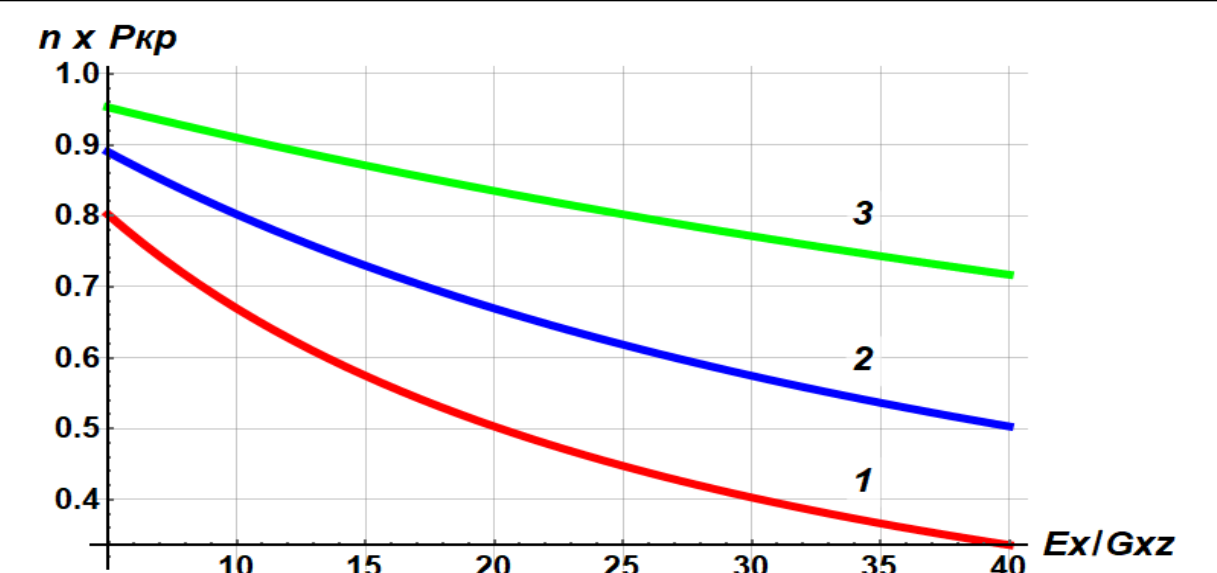
$$B(x) = E_x(x) I$$

$w(x)$ – прогиб стержня

$B(x)$ – изгибная жесткость стержня

P – сжимающая нагрузка

I – момент инерции сечения



Влияние сдвиговых деформаций на критическую силу потери устойчивости $(a/L)^2 = 0,05$ (1); $0,25$ (2); $0,01$ (3)
 a – характерный размер сечения

Изменение изгибной и межслойной жесткости композитного стержня

Переменная объемная доля

$$V_f(x)$$

$$B(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + \dots + a_n x^n$$

Повышение критической силы для стержня переменной жесткости

$$P_{кр}^{перем} \rightarrow \max$$

Возможные ограничения

V_f^{\min}, V_f^{\max} – объемная доля наполнителя

E_x^{\min}, E_x^{\max} – модуль упругости материала

$L^{-1} \int_0^L E_x(x) dx$ – условное количество наполнителя

Изменение межслойной жесткости

Модель Чамиса

$$E_x(x) = E_{xf} V_f(x) + E_{xm} (1 - V_f(x))$$

$$V_f(x) = \frac{E(x) - E_{xm}}{E_{xf} - E_{xm}}$$

$$G_{xz}(x) = \frac{G_{xzm}}{1 - \sqrt{V_f(x) (1 - G_{xzm} / G_{xzf})}}$$

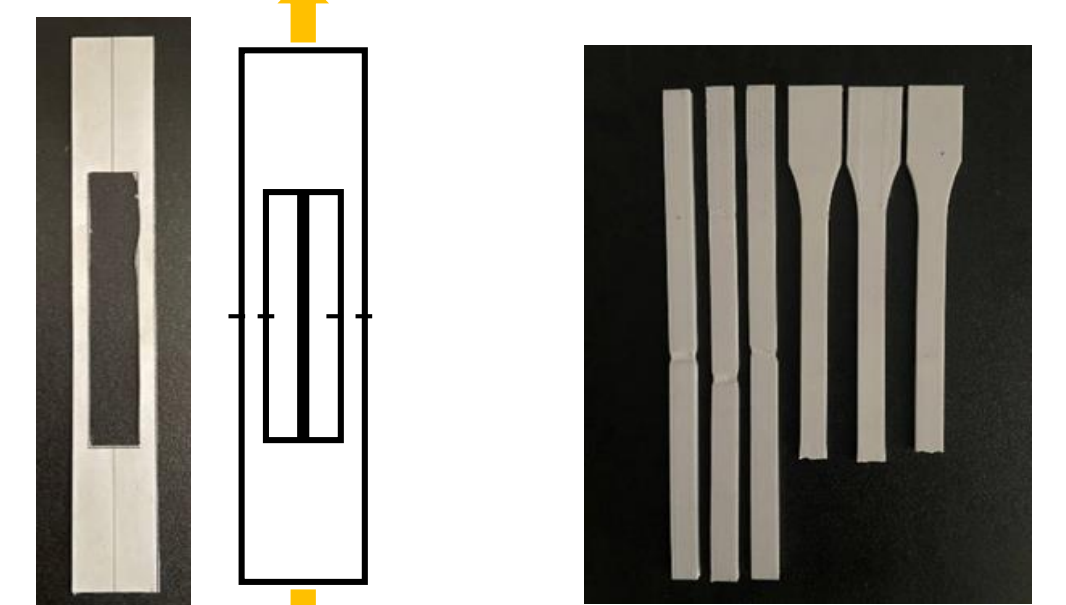
Свойства компонентов

f – волокна

m – матрица

Определение свойств компонентов

Материал	σ , МПа	E_x , ГПа
PLA	45	2,7
CCF	2400	124,8
CBF	1800	46,8



Испытание нитей CCF (углерод) и CBF (базальт)

Образцы PLA

Повышение критической силы композитного стержня

Изменение жесткости

$$B(x) = \left(a_1 \left(x - \frac{L}{2} \right)^2 + b_1 \right) I$$

Ограничения

$V_f^{\min} = 0$	$E_x^{\min} = E_{xm}$
$V_f^{\max} = 0,5$	$E_x^{\max} = E_{xf} V_f^{\max} + E_{xm} (1 - V_f^{\max})$

$$G_{xz}(x) = \frac{G_{xzm}}{1 - \left(1 - \frac{G_{xzm}}{G_{xzf}} \right) \sqrt{\frac{E_x^{\max} - 4L^{-2} (E_x^{\max} - E_x^{\min}) (x - 0,5L)^2 - E_{xm}}{E_{xf} - E_{xm}}}}$$

$$E_x^{экс} = L^{-1} \int_0^L E_x(x) dx; \quad G_{xz}^{экс} = L^{-1} \int_0^L G_{xz}(x) dx$$

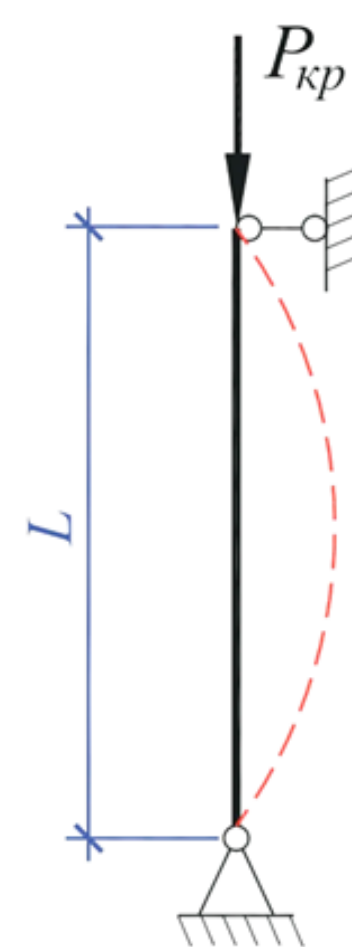
Эквивалентный стержень постоянной жесткости

Характеристики стержня

$b = 10$ мм



$L = 100$ мм



Задано $B(x)$ и $G_{xz}(x)$

Материал	$P_{сп}^{экс}$, кН	$P_{сп}$, кН	Δ , %
PLA+CCF	29,8	35,3	18,5
PLA+CBF	13,4	15,9	18,6

Задано $B(x)$ без учета G_{xz}

Материал	$P_{сп}^{экс}$, кН	$P_{сп}$, кН	Δ , %
PLA+CCF	35,7	43,3	21,3
PLA+CBF	14,4	17,2	19,4

Потеря устойчивости вращающихся композитных валов переменной жесткости

Основное дифференциальное уравнение изгиба вращающегося вала

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(B(x) \frac{d^2 w}{dx^2} \right) - \omega^2 \rho F w = 0$$

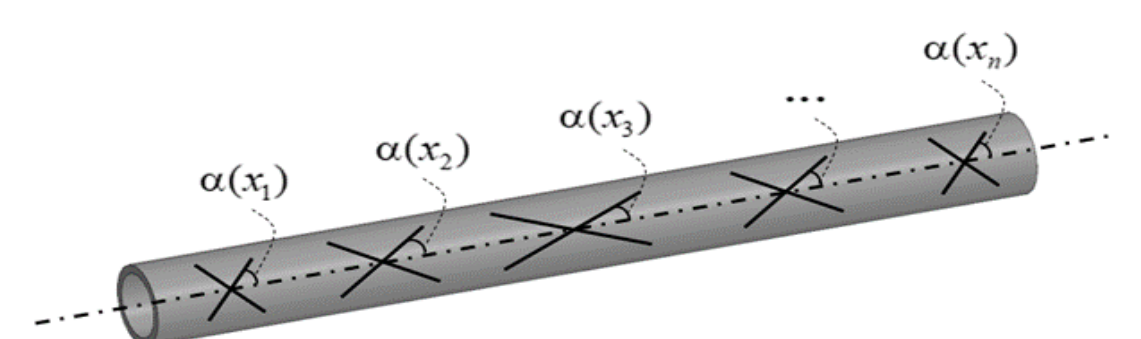


Схема вала переменной жесткости с непрерывным изменением угла намотки волокон по длине

Варьирование жесткости вала возможно за счет изменения угла намотки по длине вала при его изготовлении. Повышение критической частоты вращения снижает вероятность наступления резонанса и выхода конструкции из строя.