

ний, аппроксимирующих исходную систему уравнений. Проведены вычислительные эксперименты показавшие, что нелинейные уединенные волны, возбуждаемые в оболочках, являются сверхзвуковыми солитонами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00140.

Список литературы

- 1 Антонов, А. М. Волна Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства / А. М. Антонов, В. И. Ерофеев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. – № 4 (79). – С. 59–72.
- 2 Метод выделения полезного сигнала для системы обнаружения свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов в главном циркуляционном контуре реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором / И. В. Максимов [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2018. – № 1 (118). – С. 4–15.
- 3 Волны в сплошных средах / А. Г. Горшков [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- 4 Волны деформации в двух соосных, физически нелинейных оболочках с конструкционным демпфированием, взаимодействующих с окружающей средой и заполненных жидкостью / Л. И. Могилевич [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2022. – № 3 (140). – С. 34–60.
- 5 Дагхан, Д. Аналитическое решение уравнения Шамеля, описывающее распространение инно-звуковых волн в плазме двух типов, и их параметрическое исследование / Д. Дагхан, О. Донмец // Прикладная математика и техническая физика. – 2018. – Т. 59. – № 3. – С. 5–13.
- 6 The generalized Schamel equation in nonlinear wave dynamics of cylindrical shells / A. Zemlyanukhin [et al.] // Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 98, no 1. – P. 185–194.
- 7 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
- 8 Лукаш, П. А. Основы нелинейной строительной механики / П. А. Лукаш. – М. : Стройиздат, 1978. – 204 с.
- 9 Каудерер, К. Нелинейная механика / К. Каудерер. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1961. – 778 с.

УДК 539.3

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЬЕВ С ПОКРЫТИЯМИ В ЗУБЧАТЫХ КОЛЕСАХ ИЗ КОМПОЗИТОВ

В. В. МОЖАРОВСКИЙ, Д. С. КУЗЬМЕНКОВ, С. В. КИРГИНЦЕВА

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь

Целью расчета зубьев зубчатых колес с покрытиями из композитов (с твердой смазкой) является установление допустимых значений контактных напряжений и деформаций для действующей нагрузки и других параметров и их соответствия физико-механическим свойствам выбранных материалов пары контакта «зуб металлического колеса – покрытие из композита» при принятых геометрических соотношениях, обеспечивающих наибольший срок службы и достаточно высокие эксплуатационные свойства, получение наибольшей работоспособности зубчатой передачи.

В последнее время для проектирования зубчатой передачи стали применяться композиционные материалы на основе различных смол, а также волокнистые армированные материалы. Они имеют хорошие механические свойства, малый удельный вес, высокие динамические свойства, низкие коэффициенты трения. Расчет таких передач при контактном взаимодействии, в основном, построен на изотропных свойствах материала. Но современные волокнистые композиты имеют выраженную анизотропию механических свойств. Эти особенности необходимо учитывать при расчете и конструировании зубчатых колес из композитов.

В данной работе строится математическая модель расчета напряжённо-деформированного состояния (НДС) зубьев с покрытиями для зубчатых колес из композитов при их взаимодействии для системы контакта «зуб металлического колеса – покрытие из волокнистого материала на жестком основании», используя в основе математическую теорию упругости анизотропного тела.

Расчет НДС металлических деталей с покрытиями из композита по схеме «бесконечная упругая полоса, адгезионно связанная с жестким основанием» выполняется при следующих условиях:

- 1) толщина покрытия мала по сравнению с размерами основания;
- 2) область приложения нагрузки и толщина покрытия малы по сравнению с радиусом кривизны поверхности;
- 3) покрытие находится в плоском деформированном или плоском напряженном состоянии;
- 4) контакт зубьев с покрытием моделируется в виде контакта двух цилиндров, один из которых имеет покрытие из композита (рисунок 1).

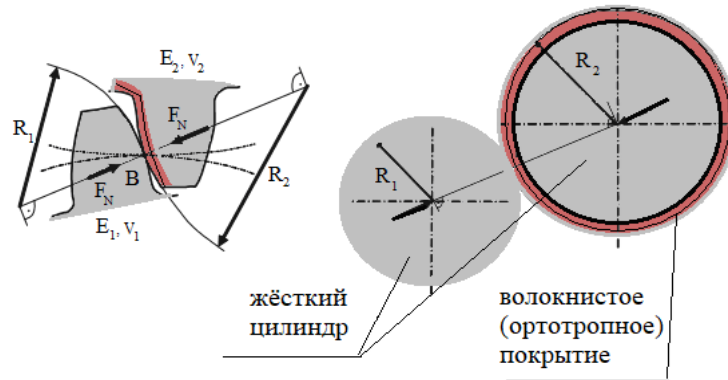


Рисунок 1 – Схема, моделирующая контакт зубьев с покрытием

При этом для толщины h и полуширины зоны контакта a выполняется условие $h/a < 1$, и закон распределения давления в зоне контакта параболический $p_0 = 3P / (4a)$; $p(x) = 3P(a^2 - x^2) / (4a^3)$; $-a \leq x \leq a$, а полуширина зоны контакта определяется по асимптотическим формулам для определения давления и зоны контакта.

Аналогично (как и для изотропной полосы) находим асимптотические зависимости для определения корреляций перемещений $v(x,0)$ и $u(x,0)$ ортотропной полосы на жестком основании при действии нормальной $p(x)$ и касательной $q(x)$ нагрузок на границе $-a < x < a$.

$$v(x,0) = (S_{22} - S_{12}^2 / S_{11}) h p(x), \quad u(x,0) = -S_{66} h q(x) \quad -a < x < a.$$

Входящие в уравнение коэффициенты при плоской деформации

$$S_{12} = (-\nu_{12} - \nu_{13}\nu_{31}) / E_1, \quad S_{22} = (1 - \nu_{32}\nu_{23}) / E_2, \quad S_{11} = (1 - \nu_{13}\nu_{31}) / E_1, \quad S_{66} = 1 / G_{12}.$$

При плоском напряженном состоянии $E_x = E_1, E_y = E_2, \nu_{xy} = \nu_{12}, \nu_{j3} = \nu_{3j} = 0, j=1,2$, где E_j, G_{12}, ν – технические постоянные материала, и выполняется закон Гука.

Определяем НДС покрытия из ортотропного материала при взаимодействии зубьев по методике [1, 2]. Таким образом, приняв параболический закон распределения давления и размеры зоны контакта a , сделав преобразования Фурье \tilde{p} и подставив в уравнения [1], полуширина контакта

$$a = \left(\frac{3}{2} PhR \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{S_{11}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Анализ напряженного состояния ортотропной упругой полосы на жестком основании делаем по программе реализации решения задачи на компьютере. Разработана программа для расчета НДС ортотропной полосы на упругом основании [2]. Например, характер изменения напряжений σ_x и σ_y по глубине покрытия под центром загрузки штампа показан на рисунке 2. Из рисунка 2 следует, что напряжения σ_y практически линейно убывают по глубине, а напряжения σ_x имеют максимальные значения на поверхности при $y = 0$ и на границе раздела с жестким основанием.

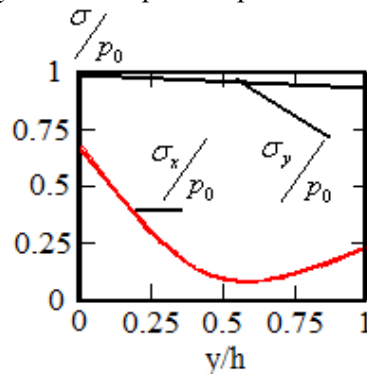


Рисунок 2 – Изменение напряжений σ_x, σ_y в покрытии $a/h = 2$:

$$E_x = 52,7 \text{ ГПа}; E_y = 11,9 \text{ ГПа}; G_{xy} = 5,62 \text{ ГПа}; \nu = 0,25; p_0 = 3P/(4a)$$

Согласно закону Гука для ортотропных тел на границе раздела с жестким основанием имеем зависимость $\sigma_x = (S_{12} / S_{11}) \sigma_y$, что подтверждается расчетами по формулам для вычисления напряжений [1]. Для разных соотношений толщин покрытий произведен расчет напряжений $\sigma_x = k\sigma_y$.

Список литературы

- 1 **Можаровский, В. В.** Прикладная механика слоистых тел из композитов / В. В. Можаровский, В. Е. Старжинский. – Минск : Наука и техника, 1988. – 280 с.
- 2 Реализация алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния элементов машин и трибологических систем / В. В. Можаровский [и др.] // Теоретическая и прикладная механика. – 2020. – № 35. – С. 37–44.

УДК 656.22

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

А. К. МОЗАЛЕВСКАЯ, Е. В. МАЛОВЕЦКАЯ

Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Динамика погрузки грузов на железных дорогах, несмотря на наличие внешних экономических и политических факторов, возрастает, оказывая существенное влияние на эксплуатационные показатели работы и распределение вагонного парка между железными дорогами, что, в частности, сказывается на значениях участковой скорости [1]. Значительное отклонение фактических показателей от планов показывает некоторую неточность получаемых прогнозных значений при использовании существующих методик, так как на практике достаточно сложно увидеть результаты работы систем и оценить качество прогнозов. Для разработки устойчивых прогнозов изменения транспортных потоков целесообразно применять метод многоэтапного системного прогнозирования, основанный на построении временных рядов [2–4], анализ которых можно проводить при помощи пакета прикладных программ [5], позволяющего в автоматическом режиме оценивать изменения вагонопотоков, которые поступают на стыковые пункты железных дорог Восточного полигона. Это позволит выдвинуть ряд предложений по повышению эффективности использования тягового и нетягового подвижного состава.

В предлагаемом докладе рассматриваются возможности применения комплексного прогнозирования при формировании пакетов прикладных программ.

Теория комплексного прогнозирования, которая объединяет неофициальные и формальные методы, всё еще нуждается в существенном развитии, поскольку введение статистических данных не дает в полном объеме отразить изменения в структуре, происходящие в транспортном комплексе Российской Федерации, в согласовании с намечаемыми и реализуемыми планами. Для анализа были взяты железнодорожные стыковые пункты Мариинск (Красноярская ж. д., Тайшет (ВСЖД), Петровский завод (ЗабЖД) и Архара (ДВЖД). Динамика размеров передачи вагонов по одному из исследуемых стыков (Мариинск) представлена на рисунке 1. По данным графиков достаточно хорошо прослеживаются значительные отклонения фактических размеров вагонопотоков от плановых.



Рисунок 1 – Размеры передачи вагонов по междорожному стыку Мариинск в 2021–2022 г.