

**Список цитируемых источников**

1. Расулов, А. В. Международный опыт финансирования транспортной инфраструктуры на примере Китайской Народной Республики / А. В. Расулов // Транспортное право и безопасность. – 2018. – № 1 (25). – С. 96–107.
2. Авдаков, И. Ю. Япония: опыт строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей / И. Ю. Авдаков // История и современность. – 2018. – № 2. – С. 136–151.
3. Cohen, J. Financing high speed rail in the United States and France: The evolution of public-private partnerships / J. Cohen, C. Kamga // Research in Transportation Business & Management. – 2013. – Vol. 6. – P. 62–70.
4. Zembri, P. Towards Oversized high-speed rail systems? Some lessons from France and Spain / P. Zembri, E. Libourel // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 25. – P. 368–385.
5. Beria, P. An Early Evaluation of Italian High Speed Rail Projects. / P. Beria, R. Grimaldi // TeMA – Journal of Land Use, Mobility and Environment. – 2011. – Vol. 4, is. 3. – P. 15–28.
6. Ван, Ч. Актуальные модели финансирования строительства высокоскоростных железных дорог / Ч. Ван // XXXV Международные Плехановские чтения : Сборник статей аспирантов и молодых ученых, г. Москва, 07–08 апреля 2022 г. – М.: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2022. – С. 139–144.
7. Васильченко, Д. Г. Контракт жизненного цикла в управлении государственной собственностью: зарубежная и российская практика / Д. Г. Васильченко // Вестник Воронежского института экономики и социального управления. – 2022. – № 2. – С. 56–59.

УДК 539.3

**ИЗГИБ ПЯТИСЛОЙНОЙ БАЛКИ СИММЕТРИЧНОЙ ПО ТОЛЩИНЕ**

**К.В. Сулов**

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Беларусь

**BENDING OF A FIVE-LAYER BEAM SYMMETRICAL IN THICKNESS**

**K.V. Suslov**

Belarusian state university of transport, Gomel, Belarus

**Аннотация.** Исследуется деформирование симметричной по толщине упругой пятислойной балки. Для несущих слоев принимаются гипотезы Кирхгофа. В сравнительно толстых легких заполнителях справедлива гипотеза Тимошенко. Выполнена постановка краевой задачи. Вариационными методами выведены уравнения равновесия балки и выписаны граничные условия. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений предполагается получать методом прямого интегрирования.

**Ключевые слова:** симметричная по толщине пятислойная балка, изгиб, уравнения равновесия, аналитическое решение.

**Annotation.** The deformation deformation of a symmetric in thickness elastic five-layer beam. Kirchhoff's hypotheses Kirchhoff's hypotheses are accepted for the bearing layers. In relatively thick lightweight aggregates the Timoshenko hypothesis is valid. The formulation of the boundary value problem is carried out. By variational methods the equations of equilibrium of the beam are derived and the boundary conditions are written out. Analytical solution of the system of differential equations is supposed to be obtained by the method of direct integration.

**Keywords:** five-layer beam symmetrical in thickness, bending, equilibrium equations, analytical solution.

Исследование напряженно-деформированного состояния слоистых элементов конструкций интенсивно развивается с середины XX века. В настоящее время многослойные конструкции активно применяются в различных сферах современной техники. Методы рас-

чета и постановки краевых задач для трехслойных элементов конструкций исследованы в монографиях [1–5]. Деформирование трехслойных стержней и пластин рассмотрено в работах [6–12]. Пятислойные пластины исследованы в статьях [13–17].

Рассматривается симметричная по толщине упругая пятислойная балка, состоящая из трех несущих слоев (внешние и центральный) и двух заполнителей. В тонких несущих слоях справедливы гипотезы Кирхгофа, в заполнителях – гипотеза Тимошенко о прямолинейности и несжимаемости нормали, которая поворачивается на дополнительный угол  $\psi(x)$ . Постановка начально-краевой задачи приведена в декартовой системе координат, связанной со срединной плоскостью центрального несущего слоя толщиной  $h_1$ . Ось  $x$  направлена вдоль осевой линии стержня. Искомыми функциями являются прогиб стержня  $w$  и относительный сдвиг в заполнителях, которые зависят от координаты  $x$ . На торцах балки ( $x = 0; l$ ) предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев ( $\psi = 0$ ).

Для вывода системы уравнений равновесия применен принцип возможных перемещений Лагранжа, при этом учитывалась работа касательных напряжений  $\tau_{xz}$  в заполнителях. В результате

$$\begin{aligned} a_1 \Psi_{,xx} - a_2 w_{,xxx} - a_3 \Psi &= 0, \\ a_2 \Psi_{,xxx} - a_4 w_{,xxx} &= -q, \end{aligned}$$

где  $a_i$  – коэффициенты

$$\begin{aligned} a_1 &= \left[ c^2 \left( \frac{2}{3} K_2^+ c + 2K_3^+ h_1 \right) \right]; \quad a_2 = \left[ \frac{1}{3} K_2^+ c^2 (2c + 3h) + K_3^+ h_1 c (h_1 + 2h + 2c) \right]; \quad a_3 = \left[ 2G^{(3)} c \right]; \\ a_4 &= \left[ \frac{1}{3} K_2^+ c^2 (2c + 3h) + K_3^+ h_1 c (h_1 + 2h + 2c) \right]; \quad K_k + \frac{4}{3} G_k \equiv K_k^+, \end{aligned}$$

$G_k, K_k$  – модули сдвига и объемного деформирования материала  $k$ -го слоя.

Здесь и далее запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования, по следующей за ней координате.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ.*

#### Список цитируемых источников

1. Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
2. Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.
3. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 376 с.
4. Старовойтов, Э. И. Механика материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 380 с.
5. Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : Ideal Press, 2023. – 381 с.
6. Starovoitov, É. I. Vibrations of round three-layer plates under the action of distributed local loads / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaya // Strength of materials. – 2002. – Vol. 34, No. 5. – P. 474–481.
7. Старовойтов, Э. И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.
8. Deformation of a Step Composite Beam in a Temperature Field / E. I. Starovoitov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, No. 4. – P. 1023–1029.
9. Захарчук, Ю. В. Напряженно-деформированное состояние круговой трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Т. 12, № 12. – С. 66–75.

10. Козел, А. Г. Влияние сдвиговой жёсткости основания на напряжённое состояние сэндвич пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – Т. 332, № 6. – С. 25–34.
11. Нестерович, А. В. Напряжённое состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Т. 12, № 12. – С. 152–157.
12. Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – Т. 22, № 1. – С. 31–35.
13. Салицкий, В. С. Изгиб защемлённой по контуру круговой пятислойной пластины / В. С. Салицкий // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Т. 15, № 15. – С. 209–213.
14. Салицкий, В. С. Изгиб круговой пятислойной пластины / В. С. Салицкий // Теоретическая и прикладная механика. – Минск, 2023. – Вып. 38. – С. 234–239.
15. Лачугина, Е. А. Поперечные колебания пятислойной упругой круговой пластины с жесткими заполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 212–219.
16. Лачугина, Е. А. Частоты собственных колебаний пятислойной круговой пластины / Е. А. Лачугина // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 38. – С. 227–233.
17. Лачугина, Е. А. Свободные колебания пятислойной круговой пластины с легкими заполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2023. – Вып. 16. – С. 111–116.

УДК 621.7.029

## ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА КАК КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

**М.В. Хеук**

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

## SURFACE PLASMA HARDENING AS A COMBINED METHOD OF SURFACE HARDENING

**M.V. Kheuk**

Brest State Technical University, Brest, Belarus

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние температуры на поверхность металла при локальном плазменном упрочнении поверхности и ее распределение по области обработки.

**Ключевые слова:** плазменный процесс, температурное поле, локальный источник нагрева, шероховатость.

**Annotation.** The article considers the effect of temperature on the metal surface during local plasma hardening of the surface and its distribution over the processing area.

**Keywords:** plasma process, temperature field, local heating source, roughness.

Одним из действенных способов повышения качества металлообрабатывающего инструмента и увеличения его рабочего ресурса является разработка новых способов упрочнения и придание специальных свойств поверхности с использованием методов и приемов инженерии поверхности. Существуют различные способы придания прочности поверхности инструментальных и штамповых сталей. Наиболее известными являются термическая закалка при высокоскоростном нагреве и охлаждении режущих кромок электронным или лазерным лучом [1], обработка компрессионными потоками плазмы, приводящая к перемешиванию поверхностных слоев и введение легирующих добавок [2].