

**Список цитируемых источников**

1. Karatas, C. Laser treatment of cemented carbide cutting tool / C. Karatas, B. S. Yilbas, A. Aleem // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 183. – P. 234–240.
2. Formation of alloying layers in a carbon steel by compression plasma flows / V. V. Uglov [et al.] // Vacuum. – 2007. – Vol. 81. – P. 1341–1344.
3. Экспериментальное исследование температурных полей на поверхности материала при действии плазменной струи / А. И. Веремейчик [и др.] // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 129–133.

УДК 539.3

**УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ  
С ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ НЕСУЩИМИ СЛОЯМИ**

**А.В. Черняк**

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

**EQUILIBRIUM EQUATIONS FOR A THREE-LAYER CIRCULAR PLATE  
WITH LINEARLY CHANGING BEARING LAYERS**

**A.V. Charnyak**

Belarusian state university of transport, Gomel, Belarus

**Аннотация.** Исследуется осесимметричный изгиб круговой трехслойной пластины с внешними несущими слоями, линейно изменяющимися по толщине. Предполагается, что для внешних слоев справедливы кинематические гипотезы Киргофа. Для относительно толстого легкого заполнителя принимается гипотеза Тимошенко – деформированная нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины и поворачивается на некоторый дополнительный угол. Получены уравнения равновесия, приведены граничные условия.

**Ключевые слова:** изгиб, трехслойная круговая пластина, переменная толщина слоев.

**Annotation.** We study the axisymmetric bending of a circular three-layer plate with external load-bearing layers that vary linearly in thickness. It is assumed that Kirgoff's kinematic hypotheses are valid for the outer layers. For a relatively thick lightweight filler, Timoshenko's hypothesis is accepted – the deformed normal remains rectilinear, does not change its length and rotates through some additional angle. Equilibrium equations are obtained and boundary conditions are given.

**Keywords:** bending, three-layer circular plate, variable layer thickness.

При работе трехслойных конструкций, содержащих жесткие и прочные внешние несущие слои и менее жесткий срединный заполнитель, отмечаются хорошие прочностные и жесткостные показатели при минимуме их весовых характеристик. Поэтому становится очевидной потребность в разработке эффективных методов расчета напряженно-деформированного состояния данного типа конструкций.

Деформирование и колебания трехслойных конструкций было исследовано в ряде работ. Так, например, монографии [1–4] посвящены разработке математических моделей статического и динамического деформирования трехслойных элементов конструкций со слоями постоянной толщины. В статьях [5–10] рассматривалось деформирование трехслойных стержней и оболочек при квазистатических нагрузках. Работы [11–13] посвящены статике и динамике трехслойных пластин со слоями переменной толщины.

Здесь приведены уравнения равновесия для трехслойной круговой пластины с несущими слоями, линейно изменяющимися по толщине  $h_1 = h_2 = h_0(1 - r/2r_0)$ . Задача решается в

цилиндрической системе координат. Для тонких несущих слоев толщиной  $h_1 = h_2$  принимаются гипотезы Кирхгофа, для толстого жесткого заполнителя  $h_3 = 2c$ , воспринимающего нагрузку в тангенциальном направлении, справедлива гипотеза о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали. Перпендикулярно внешнему слою действует распределенная нагрузка  $q = q(r)$ . На контуре пластинки предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев.

Система уравнений равновесия в обобщенных внутренних усилиях будет иметь вид:

$$\begin{cases} H_{rr} + \frac{1}{r}(H_r - H_\varphi) - Q = 0 \\ M_{rrr} + \frac{1}{r}(2M_{rr} - M_{\varphi r}) = -q \end{cases}$$

где коэффициенты  $a_i$  зависят от радиальной координаты  $r$  и определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} a_4^\pm &= c^2 \left( K_1^\pm h_1 + K_2^\pm h_2 + \frac{2}{3} K_3^\pm c \right), \quad a_5^\pm = c \left( K_1^\pm h_1 \left( c + \frac{h_1}{2} \right) + K_2^\pm h_2 \left( c + \frac{h_2}{2} \right) + \frac{2}{3} K_3^\pm c^2 \right), \\ a_6^\pm &= K_1^\pm h_1 \left( c^2 + ch_1 + \frac{h_1^2}{3} \right) + K_2^\pm h_2 \left( c^2 + ch_2 + \frac{h_2^2}{3} \right) + \frac{2}{3} K_3^\pm c^3, \quad K_k + \frac{4}{3} G_k \equiv K_k^+, \quad K_k - \frac{2}{3} G_k \equiv K_k^- \end{aligned}$$

Граничные условия на контуре  $r=r_0$  предполагаются следующими:

- при заделке –  $\psi = w = w_{,r} = 0$ ;
- при шарнирном опирании –  $\psi = w = M_{,r} = 0$ .

Подставив выражения внутренних усилий через перемещения в уравнения равновесия, получим систему линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для определения искомых функций  $\psi(r)$ ,  $w(r)$ .

#### 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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Козел, А. Г. Сравнение решений задач изгиба трехслойных пластин на основаниях Винклера и Пастернака / А. Г. Козел // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 1(54). – С. 30–37.
9. Нестерович, А. В. Неосесимметричное нагружение трехслойной круговой пластины в своей плоскости / А. В. Нестерович // Теоретическая и прикладная механика. – Минск, 2020. – Вып. 35. – С. 266–272.

10. Яровая, А. В. Термоупругий изгиб трехслойной пластины на деформируемом основании / А. В. Яровая // Прикладная механика. – 2006. – Т. 42, № 2. – С. 96–103
11. Leonenko, D. V. Vibrations of a circular three-layer plate under the action of an external load linear in time / D. V. Leonenko, M. V. Markova // Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics. – 2023. – No. 1. – P. 49–63.
12. Черняк, А. В. Изгиб сэндвич-пластины с внешними слоями, линейно изменяющимися по толщине. / А. В. Черняк // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 235–240.
13. Черняк, А. В. Уравнения равновесия трехслойной круговой пластины с переменными толщинами несущих слоев / А. В. Черняк // Проблемы безопасности на транспорте : матер. XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж.д. : в 2 ч., Гомель, 24–25 ноября 2022 г. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 269–271.

УДК 621.791.763.2

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
Т-ОБРАЗНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ КОНТАКТНОЙ  
РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКОЙ**

**Д. Н. Юманов**

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

**METHOD OF IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES STABILITY OF T-SHAPED  
WELDED JOINTS OBTAINED BY PROJECTION WELDING**

**D. N. Yumanov**

Belorussian-Russian University, Mogilev, Belarus

**Аннотация.** В работе приводится описание разработанного способа повышения стабильности механических свойств Т-образных сварных соединений при контактной рельефной сварке, основанного на использовании более точного оборудования управления процессом сварки, предлагаемого автором статьи.

**Ключевые слова:** контактная рельефная сварка, Т-образные соединения, механические свойства, системы управления циклом сварки.

**Annotation.** Paper describes developed method of increasing mechanical properties the stability of T-shaped welded joints during projection welding, based on the use of more precise welding process control equipment offered by the author of the article.

**Keywords:** contact relief welding, T-shaped joints, mechanical properties, welding cycle control systems.

Способы контактной рельефной сварки традиционно отличаются высокой производительностью процесса, малыми трудозатратами и широким обилием предлагаемых типовых соединений и узлов, которые могут быть применимы в различных областях современной машиностроительной, автомобильной промышленности. В связи с этим, при проектировании сварных конструкций, в документацию и конструкцию узлов закладывается большое количество сварных соединений и наиболее важным показателем их качества является стабильное соответствие механических характеристик требуемым показателям. Тем не менее, проводя анализ технологических процессов получения сварных конструкций с использованием типовых Т-образных соединений, замечено, что существует проблема в обеспечении стабильности прочности этих соединений [1]. В большинстве случаев эта проблема появляется по причине использования универсальных рекомендаций параметров режима сварки, которые с большими приближениями учитывают особенности Т-образных соединений.