

ЛИТЕРАТУРА

1. Mezzina, M. Decisional trees and fuzzy logic in the structural safety assessment of damaged R.C. buildings / M. Mezzina, G. Uva, R. Greco // 13thWorld Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 1–6 August 2004. – Vancouver, 2004. – P. 149–159.
2. Яловая, Ю. С. Зависимость между шириной раскрытия трещин нормального отрыва и прогибом в железобетонных балках / Ю. С. Яловая, В. В. Тур // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 15 нояб. 2019 г. / Курс. гос. ун-т; под ред. проф. С.И. Меркулова. – ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 201–208.
3. Kang, J. O. Correlation between crack widths and deflection in reinforced concrete beams / J. O. Kang, K. S. Kim, D. H. Lee, S. B. Lee // Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. – 2010. – Vol. 14. – P. 184–192.
4. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций = Еўракод. Асновы праектавання будаўнічых канструкцый: ТКП EN 1990-2011 (02250) (EN 1990:2002, IDT) (с изм.). – Введ. 01.07.12. – Минск: Стройтехнорм, 2012. – 86 с.

УДК 621.865.8

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ**

И. Э. Илюшин, доцент кафедры АТПиП, БГУТ

Резюме – предложен новый метод моделирования траекторий роботов-манипуляторов в технологическом процессе лазерной резки. Метод учитывает сложные геометрические характеристики роботизированных комплексов лазерной резки, а также технологические ограничения. Эффективность метода подтверждается результатами тестирования.

Resume – a new method for modeling the trajectories of robotic manipulators in the technological process of laser cutting is proposed. The method takes into account the complex geometric characteristics of robotic laser cutting systems, as well as technological limits. The effectiveness of the method is confirmed by the test results.

Введение. Целью исследования является разработка нового эффективного метода моделирования траекторий роботов-манипуляторов (РМ) в технологическом процессе лазерной резки. Необходимость в этом возникает при модернизации автоматизированных производств в машиностроении с применением РМ, а также при оптимизации существующих роботизированных технологических комплексов (РТК) для лазерной резки. При этом существующие подходы не учитывают ряд геометрических характеристик РТК, а также ограничения, обусловленные технологией процесса лазерной резки [1–3].

Основная часть. Моделирование траекторий осуществляется в конфигурационном пространстве РМ – пространстве, в котором в качестве условных координат выступают углы поворота звеньев и ориентации

режущего инструмента. Это пространство конфигураций разбито на два подпространства: в первое входят все конфигурации, достижимые для промышленного робота (оно же – свободное пространство), во второе – конфигурации, недостижимые для манипулятора (занятое пространство). Конфигурация робота задается в виде вектора $\mathbf{q} = [q_i]^T$ (q_i – угол в i -м сочленении манипулятора). Критерием оптимальности при поиске траектории является минимальный объем движений РМ в конфигурационном пространстве

$$\sum_{m=1}^{g-1} (\mathbf{q}_{m+1} - \mathbf{q}_m) \rightarrow \min,$$

где \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_g – начальное и конечное положения манипулятора в процессе обхода режущим инструментом контура резки. Кроме того, найденная траектория должна удовлетворять ограничениям, обусловленным технологией лазерной резки: в процессе обхода контура резки лазер должен быть ориентирован строго перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, при этом он изменяет свое положение за счет скоординированного изменения углов в сочленениях робота q_i , а также вращения инструмента относительно нормали к детали в диапазоне углов $\gamma \in (-\pi, \pi]$. Модель свободного конфигурационного пространства представлена как неориентированный граф, для которого свободные от столкновений положения робота (свободные конфигурации) соответствуют вершинам графа. Ребра графа формируются как простейшие участки, соединяющие свободные конфигурации робота, вдоль которых режущий технологический инструмент перемещается без столкновения с препятствиями. Таким образом, в процессе формирования графа важную роль играет проведение теста на столкновение. Он заключается в проверке векторных моделей препятствий \mathbf{V} и векторной модели робота $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ в текущей конфигурации \mathbf{q} на пересечение с учетом точности позиционирования δ , т. е. $\|\mathbf{M}(\mathbf{q}) - \mathbf{V}\| \leq \delta$. Основная часть конфигурационного пространства дискретизируется случайным образом, а зона, в которой определено большое количество препятствий, – упорядоченной структурой с заданным шагом. Ребрам графа соответствуют весовые коэффициенты, характеризующие объем движений манипулятора. На сформированном взвешенном графе осуществляется поиск кратчайшего пути.

Заключение. Тестирование предложенного метода моделирования траекторий проведено на примере трехмерного робота Fanuc M-710iC/50 (6 степеней свободы). Показано, что предложенный подход позволяет эффективно учесть геометрические характеристики роботизированных комплексов лазерной резки, технологические ограничения, накладываемые на ориентацию режущего технологического инструмента, а также определить положение робота, при котором режущий инструмент будет перемещаться по контуру резки с минимальным объемом движений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolgui, A. Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting / A. Dolgui, A. Pashkevich // International Journal of Production Research. – 2009. – Vol. 47, № 20. – P. 5691–5715.
2. Moharana, B. Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot / B. Moharana, R. Gupta, B. K. Kushawaha // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 176–179.
3. Чумаков, О. А. Оптимизация перемещений инструмента робота / О. А. Чумаков, С. В. Снисаренко // Информационные технологии и управление: материалы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апр. 2018 г. – Минск: БГУИР, 2018. – С. 20–21.

УДК 539.3

**ТРЕХСЛОЙНАЯ КРУГОВАЯ ПЛАСТИНА, СВЯЗАННАЯ
С ОСНОВАНИЕМ ПАСТЕРНАКА, В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ**

А. Г. Козел, доцент кафедры СМ, канд. физ.-мат. наук, БелГУТ

Резюме – приведено общее решение системы дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях, описывающей термосиловое деформирование несимметричной по толщине упругой трехслойной круговой пластины на двухпараметрическом основании Пастернака.

Resume – the general solution of the system of differential equations of equilibrium in displacements is given, which describes the thermal force deformation of an elastic three-layer circular plate asymmetric in thickness on a two-parameter Pasternak base.

Введение. К современным элементам конструкций предъявляют все более высокие требования по прочности и жесткости. При этом помимо силовых воздействий стремятся повысить сопротивляемость тепловым, звуковым, химическим, радиационным и некоторым другим негативным условиям эксплуатации. Благодаря этому распространение получили конструкции, имеющие многослойную структуру. Частным случаем являются трехслойные конструкции. Они, как правило, набраны из внешних несущих слоев, между которыми расположен сравнительно толстый легкий слой заполнителя. Слои выполняют из материалов с разными физико-механическими свойствами, что позволяет достичь заданных характеристик при относительно небольшом весе.

Несмотря на большое количество работ в исследуемой области механика многослойных конструкций и сейчас продолжает развиваться. Основы термоупругости, а также ряд задач механики слоистых стержней, пластин и оболочек при термосиловых воздействиях приведены в монографии [1]. Задачи статики и динамики трехслойных элементов конструкций, контактирующих с упругим основанием, решены в монографии [2]. Для описания реакции основания используется однопараметрическая мо-