УДК 620.178

РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ РОЛИКОВОЙ ОПОРЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ ИЗ НЕСЖИМАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Д. А. ЧЕРНОУС
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Е. В. КОДНЯНКО
Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Республика Беларусь

Опора качения является одним из базовых элементов механизмов и машин. В настоящее время в конструкциях данных опор часто используются детали с покрытиями или поверхностными слоями из полимерных материалов [1]. Подобные покрытия позволяют обеспечить требуемое значение коэффициента трения при минимизации износа детали. Повышение эффективности использования полимерных покрытий в конструкциях опор качения требует разработки расчетной методики, позволяющей прогнозировать значения функциональных параметров соответствующих контактных пар. Решению контактных задач для тел с покрытиями посвящено множество научных публикаций. Точное решение данной задачи для покрытия произвольной толщины основано на использовании интегрального преобразования Фурье и последующем решении системы интегральных уравнений. Сложность математического аппарата затрудняет непосредственное использование точного решения в практических инженерных расчетах контактных пар. В связи с этим при анализе контактного взаимодействия деталей машин для тонких полимерных покрытий используют различные асимптотические приближения и упрощенные модели. Наиболее простой и при этом наиболее распространенной является модель Винклерова основания. Однако большинство полимеров, используемых для антифрикционных покрытий, по своим упругим характеристикам близки к несжимаемым (коэффициент Пуассона ν больше 0,45). Для покрытия, жестко связанного с поверхностью детали и образованного несжимаемым материалом, модель Винклерова основания оказывается неприменима. В этом случае значение коэффициента нормальной жесткости (коэффициента постели) стремится к бесконечности. Ранее [2] авторами была предложена методика решения контактной задачи для жесткого цилиндра, имеющего тонкий деформируемый обод. Данная методика основана на асимптотическом приближении второго порядка по малому параметру, равному отношению толщины покрытия к полуширине области контакта. Но непосредственное использование этой методики для несжимаемого материала обода также невозможно. При $\nu = 0,5$ некоторые коэффициенты в определяющих дифференциальных уравнениях равны нулю, что приводит к изменению порядка данных уравнений. Следовательно, возникает необходимость в существенном преобразовании ранее известной математической модели в случае несжимаемости деформируемого обода. В рамках существующих расчетных методик решения контактных задач для несжимаемого слоя не учитывается действие сдвигового контактного напряжения.

В связи с вышесказанным целью настоящего исследования является разработка основанной на асимптотическом приближении второго порядка методики решения контактной задачи для жесткого тела качения с упругим несжимаемым ободом при учете наличия в области контакта зон сцепления и проскальзывания.

Предложена модификация ранее используемой асимптотической методики решения контактных задач. Данная модификация направлена на получение решения в случае несжимаемого материала обода. При этом в готовом виде используются составленные в рамках исходной методики определяющие дифференциальные уравнения для контактного давления и сдвигового контактного напряжения. Для несжимаемого материала некоторые коэффициенты в этих уравнениях равны нулю, что обусловливает необходимость изменения хода решения и удовлетворяемых граничных условий. В частности, для несжимаемого материала обода не удается удовлетворить условие неразрывности производной от сдвигового контактного напряжения по продольной координате на границе раздела зон сцепления и проскальзывания. При этом приходится дополнительно вводить условие равенства нулю производной от контактного давления на границе области контакта.

Для зоны сцепления принимаются заданными смещения точек поверхности обода. Контактное давление и сдвиговое контактное давление определяются как решение системы двух дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. В зоне проскальзывания задано вертикальное смещение точек. Для сдвигового контактного напряжение выполняется закон трения Кулона. Контактное давление определяется как решение дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами. При известном контактном давлении определяются горизонтальные смещения точек в зоне проскальзывания. Вне области контакта смещения не определяются. Расчетная методика позволяет не только решить контактную задачу, но и описать напряженно-деформированное состояние деформируемого обода вблизи области контакта.

В качестве примера использования разработанной методики рассмотрено прижатие стального ролика с тонкой полиуретановой обкладкой к стальной горизонтальной шероховатой поверхности. Обкладка жестко связана с поверхностью ролика и находится в условиях плоской деформации. Материал обкладки рассматривается как несжимаемый линейно упругий. Ролик и опорная поверхность принимаются недеформируемыми. Геометрические размеры деталей и характеристики материалов в расчетном примере соответствуют роликовой опоре скипа, перемещающегося по проводникам скипо-клетевого ствола № 2 1РУ ОАО «Беларуськалий». Построены расчетные диаграммы «сила – смещение» для различных значений коэффициента трения. При фиксированном значении силы получены эпюры контактного давления и сдвигового контактного напряжения, установлено распределение интенсивности тензора напряжений в ободе. Полученные расчетные оценки сопоставлены с результатами использования конечно-элементной модели рассматриваемой контактной поры. Данная численная модель реализована в программном продукте ANSYS. Для случая пренебрежения трением в области контакта проведено сопоставление с результатами, полученными на основе точного решения задачи теории упругости для полосы произвольной толщины.

Показано, что расчетные оценки параметров контактного взаимодействия, полученные на основе разработанной методики, хорошо согласуются с результатами использования метода конечных элементов и точного решения краевой задачи теории упругости. В рассмотренном примере при фиксированном значении вертикальной нагрузки на составной цилиндр и изменении коэффициента трения от нуля до 0,3 относительное отклонение полученных значений вертикального смещения центра цилиндра от соответствующих оценок, полученных в рамках конечно-элементной модели, уменьшилось от 12 до 10 %. Для максимального контактного давления данное отклонение изменилось с 5 до 11 %, а для максимального значения интенсивности тензора напряжений в деформируемом ободе – с 6 до 9 %.

Кроме того, установлено, что при действии на составной цилиндр вертикальной (прижимающей) силы максимум интенсивности тензора напряжений в несжимаемом ободе локализуется на «внутренней» поверхности (поверхности сцепления обода с жестким цилиндром) на некотором расстоянии от вертикальной оси, проходящей через центр области контакта. Это наблюдение подтверждается результатами конечно-элементного моделирования. Подобное расположение максимума интенсивности тензора напряжений характерно только для материала обода, для которого коэффициент Пуассона принимает значения более 0,4. В противном случае максимум интенсивности локализуется на оси симметрии (линии действия вертикальной силы) на некотором расстоянии от области контакта.

Преимущество разработанной методики перед альтернативными заключается в возможности использования относительно простых аналитических соотношений. В отличие от аналогичных существующих аналитических решений модифицированная методика позволяет учесть наличие в области контакта зон сцепления и проскальзывания.

Список литературы

1 **Baryshnikova, A. M.** Development of production technology for polymer coated wire based on the study of the stress state scheme in the progress of drawing / A. M. Baryshnikova, M. P. Baryshnikov, L. V. Nosov // The theory and progress engineering of metallurgical production. – 2020. – No. 3(34). – P. 21–25.

2 **Черноус, Д. А.** Асимптотический подход к решению контактной задачи для тела качения с тонким деформируемым ободом / Д. А. Черноус, Е. В. Коднянко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – № 1 (62). – С. 79–87.