

УДК 620.173.22:621.730 (575.2) (04)

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРУГОВЫХ ОПОР СО СПЛОШНЫМИ И НЕСВЯЗНЫМИ СРЕДАМИ

М.А. Демидова – соискатель

Research results on determination of interrelation dynamics of circular support (basement) with solid and cohesionless medium are presented in this article.

Многолетняя практика свидетельствует о том [1], что в различных областях науки и техники актуальными для практических приложений остаются системные экспериментально-теоретические данные как по изменению силовых параметров, так и кинематических составляющих, установленные в процессе контактирования опорных поверхностей различного назначения со всевозможными подстилающими объектами. Все перечисленное прежде всего относится к нагружению по схеме силового взаимодействия вращающихся круговых опор с разнопрочняющимися твердыми телами и несвязными средами. Такое утверждение не случайно, поскольку упомянутая схема находит широкое распространение при эксплуатации движителей автотранспортной техники и колес железнодорожных составов; пластическом деформировании металлов и порошковых материалов прокаткою; работе вращающихся агрегатов энергетических систем, деталей машин и кинематических пар; упрочнении ответственных узлов техники и оборудования поверхностным пластическим деформированием; уплотнении дорожных полотен в процессе строительства автомобильных и железных дорог.

Принимая во внимание такое разнообразие в применении упомянутой схемы и в этой связи установление наиболее благоприятных условий ее эффективного использования в практических приложениях, следует учитывать и тот факт, что здесь в сравнении с другими схемами нагружения подстилающих объектов

на динамику развития всех параметров, в том числе и кинематических составляющих, более заметное влияние оказывают силы внешнего трения и упругие формоизменения опорных поверхностей. Из системных исследований следует [1], что без определенного резерва сил внешнего трения нормальное взаимодействие вращающихся круговых опор с любыми подстилающими средами в принципе не осуществимо, а грамотное управление развитием упругих формоизменений опорных поверхностей позволяет более производительнее эксплуатировать любое оборудование, механизмы, технику и машины, при работе которых реализуется рассматриваемая схема силового контактирования.

Основываясь на изложенных предпосылках, на первом этапе проведены системные экспериментально-теоретические исследования по установлению упругих формоизменений круговых опор при их взаимодействии с подстилающими объектами. Основные результаты, полученные при этом, представлены в работе [2]. Здесь благодаря использованию классических положений естественно-технических наук, выведены аналитические зависимости, позволяющие учитывать трансформирование упругих формоизменений круговых опор при всех возможных условиях их контактного взаимодействия с подстилающими объектами. Это, во-первых, когда в локальной области наблюдается равномерное распределение нормальных напряжений (условия

близкие к отсутствию внешнего трения); во-вторых, когда эпюра нормальных напряжений представлена ординатами половины эллипсоида (условия упругого контакта); в-третьих, когда нормальные напряжения изменяются от σ_s на краях вращающихся круговых опор и до их максимального значения σ_1 в центре локальной области контакта (условия общего случая). При этом рабочая часть опорной поверхности в результате упругих формоизменений приобретает вид эллиптического параболоида и этим самым оказывает существенное влияние на искажение динамики всех процессов, происходящих в локальной области.

На втором этапе исследовались изменения сил внешнего трения и составляющих контактных напряжений [3]. Для установления трансформирования упомянутых силовых параметров в процессе проведения экспериментов применялся высокоэффективный способ, защищенный авторским свидетельством [4]. Как следует из анализа системных данных, полученных при проведении этих системных исследований, на закономерности изменения нормальных напряжений и сил внешнего трения существенное влияние оказывают многие факторы. Среди них прежде всего целесообразно упомянуть такие, как исходные размеры и форма пластически деформируемых твердых тел, их физико-механические свойства, чистота обработки рабочих частей, скорость вращения круговых опор и качество используемых смазочных материалов.

Что же касается заключительного этапа исследований, то здесь определялось развитие кинематических явлений в процессе контактирования тех же опор с деформируемыми твердыми (сплошными) и сыпучими (несвязными) средами. Обобщенные данные этих широко-масштабных работ представлены в настоящей статье. Следует отметить, что на всех этапах этих экспериментально-теоретических работ в широком диапазоне варьировались изменения исходных параметров по граничным условиям, соотношениям взаимодействующих площадей касания, физико-механическим свойствам, режимам действия нагрузок и др.

Прежде чем перейти к изложению данных, установленных в процессе проведения заключительного этапа исследований, целесообразно

остановиться на главных моментах, описанных в технической литературе о развитии кинематических явлений при рассматриваемой схеме контактного взаимодействия. В частности, в работе [5] отмечается, что при условии нагружения твердых тел круговыми опорами абсолютные и относительные обжатия по сечениям локальной области заметно отличаются друг от друга. Это вызвано как различием степени внедрения накатывающихся цилиндрических частей опор вдоль подстилающей среды, так и перераспределением нормальных и касательных составляющих усилий деформирования во всех направлениях. Последнее авторы [6, 7] объясняют тем, что вдоль контактных поверхностей нагружаемых объектов цилиндрические части опор имеют неодинаковые значения углов конусности φ (рис. 1,а). В результате горизонтальные составляющие сил реакции R_x и внешнего трения T_x не только отличаются по своим величинам, но и противодействуют друг другу. При этом действие первой из них совпадает с направлением смещения деформируемой среды, а T_x – против этого направления.

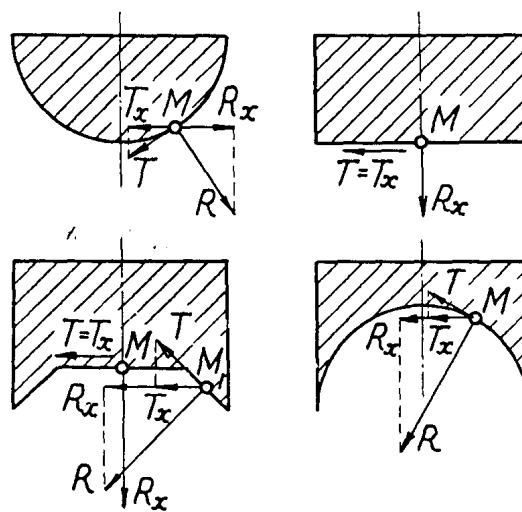


Рис. 1. Схема распределения составляющих усилий при взаимодействии различных опор с подстилающей средой.

Учитывая изложенное, при исследованиях необходимо было принимать во внимание упомянутые предпосылки, а также тот факт, что при вращении круговых опор подстилаю-

шая среда в каждый момент подвергается нагружению не по всей длине, а лишь на каком-то определенном участке. При этих условиях, в виду периодичности процесса, целесообразно рассматривать мгновенную локальную область взаимодействия, а развитие кинематических явлений – в наиболее характерные моменты. Подобный методический подход к проведению этих сложных исследований позволяет рассматривать изменения кинематических параметров и развитие вторичных явлений при статическом нагружении круговыми опорами моделей подстилающих сред. Здесь в качестве последних использовались образцы из различных металлов, в срединной части которых создавались выемки того же радиуса, что имеют круговые опоры. Кроме того, по их оси выфрезировывались пазы для свободного смещения деформируемой среды.

Такая форма образцов в процессе нагружения круговыми опорами с хорошим приближением к действительности позволяет судить об изменении кинематических параметров подстилающих сплошных сред в мгновенной локальной области контакта. Подобное следует также и из сопоставления полученных нами экспериментальных результатов с данными, представленными в работе [8]. Что же касается развития кинематики течения в объеме нагружаемых тел, то для рассматриваемого случая силового взаимодействия вполне приемлема схема, представленная в статье [9]. Ее авторы, основываясь на теоретических предпосылках с учетом допущений о небольших значениях нормальных напряжений, считают, что при рассматриваемой схеме распространение кинематики течения деформируемых сред в основном определяется действием главных касательных напряжений. Однако системные данные [1], полученные и по другим схемам нагружения (см. рис. 1), свидетельствуют о том, что изменение силовых параметров и кинематических составляющих зависит также от формы и шероховатости опорных поверхностей, физико-механических свойств деформируемых твердых тел, соотношений их геометрических размеров и степени деформации.

С целью установления закономерностей изменения кинематики течения и развития

вторичных явлений в процессе взаимодействия круговых опор с подстилающими сплошными средами в широких пределах варьировались перечисленные факторы. В частности, данные, полученные при взаимодействии опорных поверхностей шестого класса шероховатости с образцами из упрочняющихся материалов, свидетельствуют о том, что в случае $n_{b_0} = b_0 / h_0 = 0,5$ ($b_0 = 30$, $h_0 = 60$ и $l_0 = 40$ мм) уже при степени деформации $\varepsilon = 2,5\%$ наблюдается заметное перемещение контактных слоев. При этом коэффициент зоны прилипания $b_{пр} = (1 - r_{ск}) = 0,82$. В случае повышения обжатий упомянутое явление интенсифицируется и по достижении $\varepsilon = 80\%$ в локальной области взаимодействия доминирует скольжение. По мере его развития зона прилипания, трансформируясь, расщепляется на две части ($\varepsilon = 95\%$) и изменяет свое местоположение относительно геометрического центра. Перечисленные кинематические явления получают реализацию также и при заметно меньших обжатиях в случае увеличения соотношений исходных размеров образцов и применении для их изготовления материалов с более высокими механическими характеристиками.

Подобные тенденции проявляются и при использовании в опытах круговых опор с улучшенной механической обработкой рабочих поверхностей. Однако здесь в виду меньшего влияния внешнего трения начало перемещения контактных слоев, расщепление и миграция зоны прилипания в локальной области наступает при меньших степенях деформации. Причем в случае взаимодействия опор с образцами, имеющими $n_{b_0} = 0,5$, уже по достижении $\varepsilon = 2,5\%$ значение $r_{пр} = 0,62$ и одновременно с сокращением зоны прилипания получают развитие вторичные явления. При $\varepsilon = 15\%$ завершается разделение упомянутой зоны на две самостоятельные части и по отношению к исходному положению геометрического центра она заметно смещается. Интенсивное развитие этих явлений сохраняется почти до $\varepsilon = 20\%$. С увеличением обжатий скольжение по контакту несколько замедляется и при степени деформации 25% значение $r_{пр} = 0,17$. Это сказывается также на расщеплении и миграции зоны прилипания. Системные данные, полученные при самых раз-

личных условиях контактирования в процессе проведения описываемых исследований, позволили предложить уточненную модель развития кинематики течения при упругопластичном взаимодействии вращающихся круговых опор с подстилающими сплошными средами (она представлена на рис. 2).

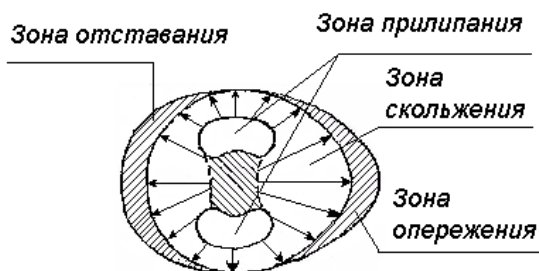


Рис. 2. Схема развития кинематики течения при взаимодействии круговой опоры со сплошной средой.

Имея результаты системных исследований по установлению изменений кинематических параметров и вторичных явлений при различных условиях силового контактирования круговых опорных поверхностей с подстилающими сплошными телами, важно было также установить закономерности развития упомянутых явлений в случае взаимодействия подобных опор с несвязными средами. К последним, как известно [10], относятся различные пески, рыхлосыпучие горные породы, слабые грунты, порошковые материалы и др. Решение контактных задач с использованием методов механики здесь наталкивается на существенные трудности, связанные с тем, что при их практическом применении исходят из полной пластичности несвязных сред. Однако высокий коэффициент дилатансии сыпучих материалов, которым обычно пренебрегают, делают сами исследования малоэффективными. По этой причине в процессе рассмотрения взаимодействия круговых опорных поверхностей с несвязными средами положения механики следует использовать, корректируя их на основе надежных экспериментальных данных. Однако такие, как показано в работах [1, 10], в технической литературе отсутствуют.

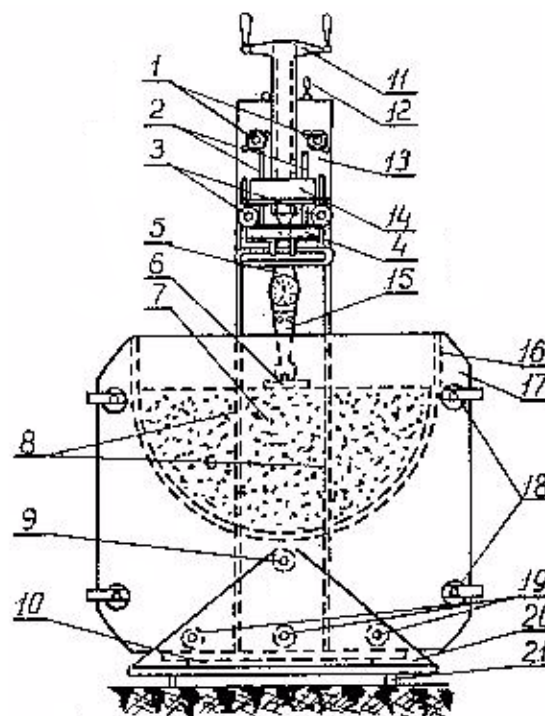


Рис. 3. Стенд: 1 – винты крепления поворотной платформы; 2 – направляющие стержни; 3 – пальцевый шарнир; 4 – переходная колодка; 5 – динамометрическое устройство; 6 – опора; 7 – сыпучая среда; 8 – вертикальные стенки из прозрачного материала; 9 – центральный регулировочный винт; 10 – продольный шарнир; 11 – штурвал подъема платформы; 12 – винтовой шток; 13 – нагрузочное устройство; 14 – направляющая колодка; 15 – кронштейн для крепления опоры; 16 – вакуумный шланг; 17 – стенки из прозрачного материала; 18 – струбины; 19 – центровочные винты; 20 – станина; 21 – винты для выставления лотка по вертикали.

По упомянутым причинам важным является получение надежных результатов о вкладе каждого из основных факторов в развитие механики силового взаимодействия круговых опорных поверхностей с несвязными средами. Для достижения этой цели использован специальный исследовательский стенд (рис.3) и по сравнению с существующим [11] усовершенствованный вариант метода муаровых полос [12]. При их практическом использовании в начале на пластинку закрепленного фотоаппарата фиксируется картина исходного состоя-

ния сыпучего массива в лотке стенда. Затем после осуществления силового взаимодействия круговой опоры с несвязной средой регистрируется ее новое сложение. В тех местах, где перемещений частиц не наблюдается, картины совпадают, а там, где они смещаются, их положение видно до и после контакта (рис. 4). На основе измерения длин отрезков перемещений и углов наклона, а также определения усилий и глубины внедрения устанавливаются кинематические параметры и напряженно-деформированное состояние в локальной области контакта.

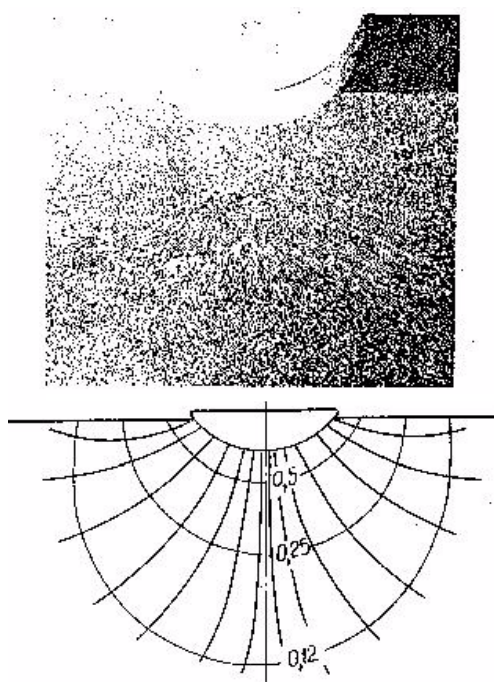


Рис. 4. Кинематическая картина при взаимодействии круговой опоры с несвязной средой.

При проведении опытных исследований в качестве несвязных сред использовались эоловые пески Центральной Азии [13] и порошковые материалы, изготовленные по способу, защищенному авторским свидетельством [14]. Причем до проведения экспериментов, учитывая важность получения полной информации об упомянутых сыпучих средах, производилось определение их дисперсионного состава, взаимного расположения и условий сближения

составляющих частиц в плоской и объемной постановках, фактической площади контакта, текучести и др. Что же касается опытных исследований, то здесь на разных этапах сближения опорных поверхностей с несвязной средой осуществлялось также наблюдение за перемещениями составляющих частиц на верхней кромке и внутреннем объеме сыпучего массива. При этом в процессе сближения круговой опоры с несвязной средой благодаря использованию усовершенствованного метода муаровых полос [12] устанавливалась кинематика перемещений частиц среды. В случае рыхлого ее состояния, как показывают исследования, даже значительное нагружение не вызывает заметных радиальных перемещений. Здесь происходит лишь уплотнение подстилающей среды в аксиальном направлении, а положение частиц на верхней кромке в непосредственной близости от опоры практически не меняется. Иное дело в случае контактирования опоры с несвязной средой плотного сложения, когда наблюдается выход частиц из-под рабочей поверхности. При этом в радиальном направлении с реализацией кольцеобразной, а во внутреннем объеме – веерообразной картин.

Из рис. 4 следует, что при взаимодействии круговой опоры с несвязной средой составляющие частицы за счет расклинивающего действия выпуклой части его рабочей поверхности перемещаются во всех направлениях, в том числе с одновременным выходом на внешнюю кромку. При этом различие углов конусности φ вдоль контактной части опоры вызывает соответствующее отличие абсолютных и относительных составляющих аксиальных смещений круговой опоры и перераспределение силовых составляющих в разных направлениях. В результате здесь, как и в опытах со сплошными образцами, радиальные составляющие сил реакции R_x и внешнего трения T_x не только отличаются по своим значениям, но и противодействуют друг другу (направлены в разные стороны). Ввиду того, что действие нормальной составляющей R_x совпадает с направлением перемещения частиц несвязной среды, а тангенциальная составляющая T_x направлена против их движения, то такая схема создает благоприятные условия для смещения

частиц во всех направлениях, в том числе и на верхнюю кромку.

Следует отметить, что в случае $\varphi_1=0$ касательная в точке у самого основания выпуклости направлена горизонтально и условия работы круговой опоры в ней соответствуют тем, которые реализуются при взаимодействии плоской модели с сыпучей средой [10]. Причем по мере увеличения угла конусности и удаления упомянутых точек от нижней части выпуклостей опорных поверхностей составляющая R_x увеличивается по синусоиде с падающей интенсивностью, а тангенциальная составляющая T_x уменьшается по косинусоиде, наоборот, с возрастающей интенсивностью. В результате такого изменения обеих составляющих закономерно улучшается возможность смещения частиц несвязных сред из-под выпуклой поверхности круговых опор во все стороны, в том числе и на верхнюю кромку. При этом кинематика течения даже при незначительных усилиях, а после разуплотнения и, следовательно, потери устойчивости несвязной средой, внедрении выпуклой контактной поверхности протекает практически при неизменных нагрузках.

Кроме того, на основе системных результатов с использованием известных приемов определен характер изменения линий равных перемещений по следующей схеме. При этом в начале на экспериментально установленную кинематическую картину накладывается вспомогательная сетка (см. нижнюю часть рис. 4). В ее узлах измеряются величины перемещений частиц несвязной среды и наклон траекторий. Затем данные интерполируются и с учетом получаемых результатов строятся линии равных перемещений. Необходимо заметить, что наблюдающиеся при взаимодействии круговых опор с несвязными средами различного рода явления развиваются практически по тем же закономерностям, которые реализуются в процессе контактирования опорных поверхностей со сплошными телами из упругих и упрочняющихся материалов [1]. Однако в упомянутых случаях из-за обратимого противодействия упругости или упрочнения твердых тел в отличие от условий взаимодействия круговых опор с несвязными средами требуется заметное повышение усилий нагружения.

Таким образом, системные данные, полученные в процессе проведения широкомащтабных исследований, свидетельствуют о необходимости учета реальной картины развития кинематических явлений при всевозможных условиях упругопластичного взаимодействия круговых опорных поверхностей в различных областях науки и техники. Сказанное подтверждается результатами экспериментально-аналитических исследований по установлению изменений силовых параметров и кинематических составляющих локальной области в процессе контактирования круговых опор со сплошными и несвязными средами. Именно на основе подобных данных могут успешно разрабатываться мероприятия по управлению изменением кинематических явлений, трансформированием фактической площади касания, развитием напряженно-деформированного состояния и снижением усилий во всех случаях, когда возникает необходимость в их передаче от одного элемента конструкции к другому, проведении прочностных расчетов, прогнозировании природных явлений, решении технологических задач пластичности и выборе рациональных форм опорных поверхностей в машиностроении, транспортной технике, инженерных сооружениях, обработке металлов давлением, порошковой металлургии, сельскохозяйственных машинах, агрегатах гидроэлектростанций и др.

Литература

1. *Свиденко В.Н.* Закономерности механики упругопластического контакта при больших конечных деформациях и некоторые их приложения. – Алма-Ата: ИММаш НАН РК, 1992. – 487 с.
2. *Переплетова М.А., Свиденко В.Н.* Математическое моделирование упругих формоизменений вращающихся круговых опор при взаимодействии с подстилающими средами // Математические методы и моделирование при проектировании горных дорог. – Бишкек: КГУСТА, 1998. – С.5–9.
3. *Переплетова М.А., Свиденко В.Н.* Изменение составляющих контактных напряжений при взаимодействии опорных поверхностей с упрочняющейся средой // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации

- автомобильных и железных дорог в горной местности. – Бишкек: КГУСТА, 1999. – С.86–94.
4. А.с. СССР №382444. Способ определения контактных напряжений / Свиденко В.Н., Пресняков А.А., Шулькин В.Я. // Б.и. – 1973, №23.
 5. *Тарновский И.Я.* Формоизменения при пластической обработке металлов. – М.: Металлургиздат, 1954. – 534 с.
 6. *Унксов Е.П.* Инженерная теория пластичности. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
 7. *Рибиндер П.А., Шукин Е.Д.* Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физ. наук. – 1972. – Вып.1. – Т. 108. – С.3–42.
 8. *Колташников А.И.* Прокатка листов из легких сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
 9. *Иванов И.И., Колташников А.И.* Исследование распространения деформации при осаживании и прокатке // Обработка давлением алюминиевых и жаропрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1967. – С.31–40.
 10. *Свиденко В.Н.* Результаты фундаментально-прикладных исследований в области механики несвязных сред // Материалы Международн. научн.-практич. конф. “Современное состояние и перспективы развития строительной науки”. – Ч.1. – Бишкек: КГУСТА, 2000. – С.120–127.
 11. *Макушок Е.М., Сегал В.М., Калиновская Т.В.* Новые методы исследования процессов обработки металлов давлением. – Минск: Наука и техника, 1973. – 127 с.
 12. А.с. СССР №769317. Способ определения деформации объекта / Свиденко В.Н., Лисицын В.Н., Тулеушев А.И. // Б.и. – 1980, №37.
 13. *Свиденко В.Н., Муралиев Ж.Ж., Даулетбаков А.И.* Анализ возможных моделей объемных структур сложения и схем взаимодействия несвязных частиц // Математические методы и моделирование при проектировании горных дорог. – Бишкек, КГУСТА, 1998. – С.12–26.
 14. А.с. СССР №1650365. Способ получения порошка из стружковых отходов шарикоподшипниковой стали / Свиденко В.Н., Карпенюк А.Н., Квятковская М.Н. // Б.и. – 1991. – №19.