

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Факультет Прикладной математики и механики

Направление подготовки 15.03.03 Прикладная механика


Профиль Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг

Кафедра Вычислительная математика, механика и биомеханика

Допускается к защите
Зав. кафедрой _____
(Столбов В.Ю.)
« » _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА


На тему Анализ влияния материала антифрикционной прослойки на фрикционное
контактное деформирование сферической опорной части

Студент Панькова Анастасия Петровна ()

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 75 стр.

Руководитель ВКР

 (Каменских А.А.)

Консультант

_____ (_____)

Пермь 2020 г.

Реферат

Дипломная работа 75 страниц, 61 рисунок, 68 источника, 9 таблиц.

Ключевые слова: МКЭ, антифрикционный композиционный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, модифицированный фторопласт контакт, трение, смазка, опорные части мостовых сооружений.

Целью работы «Анализ влияния материала антифрикционной прослойки на фрикционное контактное деформирование сферической опорной части» являлся численный анализ деформационного поведения элементов сферической опорной части в рамках реализации фрикционного контактного взаимодействия верхней плиты со сферическим сегментом и нижней плиты со сферическим вырезом опорной части через упругопластическую полимерную прослойку.

Задачи:

1. Выполнить математическую постановку задачи о контакте элементов сферической опорной части.
2. Установить хорошее количественное и качественное соответствие результатов решения контактной задачи в программном комплексе ANSYS с аналитическим решением задачи, на примере контактной задачи Герца.
3. Выполнить численную реализацию фрикционного контактного взаимодействия верхней плиты со сферическим сегментом и нижней плиты со сферическим вырезом опорной части через упругопластическую полимерную прослойку, в программном комплексе ANSYS.
4. Выполнить анализ полученных данных при численном решении задачи.

Содержание

Введение	8
1. Анализ современного состояния научных исследований о деформационном поведении элементов опорных частей мостов	10
2. Математическая постановка	15
3. Анализ контактного взаимодействия сферического стального штампа с полупространством из современных антифрикционных полимерных материалов.....	18
3.1. Аналитическое решение задачи Герца.....	18
3.2. Численная реализация задачи Герца без учета фрикционных свойств в рамках теории упругости	20
3.3. Численная реализация задачи Герца с учетом фрикционного контакта в рамках теории упругости	22
3.4. Численная реализация задачи Герца с учетом фрикционного контакта в рамках деформационной теории упругопластичности	24
3.5. Сравнение результатов численного моделирования задачи Герца в упругой и упругопластической постановке задачи.....	25
3.6. Выводы по главе.....	256
4. Деформирование антифрикционного слоя скольжения опорной части из разных полимерных материалов и композитов на их основе.....	27
4.1. Постановка задачи контакта элементов сферической опорной части.....	27
4.2. Анализ параметров контактного взаимодействия	28
4.3. Анализ параметров контакта на относительно свободном торце антифрикционной прослойки	34
4.4. Анализ осадки верхней плиты со сферическим сегментом и интенсивности напряжений и пластических деформаций.....	37
4.5. Выводы по главе.....	41
5. Анализ влияния фрикционных свойств материалов на контакт элементов сферических опорных частей	43
5.1. Анализ параметров контактного взаимодействия для полимерной прослойки стандартной толщины на основных поверхностях контакта	43
5.2. Анализ изменения параметров контактного взаимодействия при увеличении толщины антифрикционной прослойки из разных материалов ..	45
5.2.1. СВМПЭ производства Германии.....	45
5.2.2. Антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена	48
5.2.3. Модифицированный фторопласт.....	49
5.3. Анализ параметров контакта на относительно свободном торце прослойки	51
5.3.1. СВМПЭ производства Германия	53
5.3.2. Антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена	56
5.3.3. Модифицированный фторопласт.....	59

5.4. Анализ интенсивности напряжения и пластических деформаций	62
5.5. Выводы по главе.....	66
Заключение	68
Список литературы	70

Введение

К транспортно-логистическим системам в целом и к опорным частям мостовых строений в частности предъявляют высокие требования относительно прочности, надежности, долговечности и устойчивости. Опорные части мостовых сооружений воспринимают широкий спектр температурно-силовых воздействий, связанных с нагрузками от транспортного потока, ветровой нагрузки, деформаций из-за перепада температур и т.д. При этом на работу конструкции опорных частей во многом влияют антифрикционные полимерные слои скольжения.

В настоящий момент существует большой выбор современных антифрикционных материалов, к которым относятся полимеры и композиты на их основе. Их в той или иной мере можно использовать в качестве антифрикционных слоев скольжения. В частности, ООО «АльфаТех» в рамках работ по оптимизации конструкций сферических опорных частей провел ряд исследований физико-механических, фрикционных и реологических свойств широкого набора полимерных материалов и композитов на их основе (более 30 материалов). Исследования проводились на базе Института механики сплошных сред УрО РАН д.ф.-м.н. Адамовым А.А. В результате серии натурных экспериментов был получен набор физико-механических характеристик материалов и ряд закономерностей их деформационного поведения. При этом требуется оценка работы материалов антифрикционных слоев скольжения в конструкциях сферических опорных частей.

Для расчета мостовых сооружений с новыми конструкционными и технологическими решениями требуются натурные эксперименты, но для их проведения нужно большое обилие ресурсов не только материальных, но и временных, а также уникальные экспериментальные установки. Для существенного сокращения продолжительности исследования и материальных расходов стали использовать математическое моделирование напряженно-деформированного состояния объектов механики, техники, строительства. Так, например, в современных задачах механики деформированного твердого тела одним из основных типов, являются задачи о контактном взаимодействии тел. Механика контактного взаимодействия занимается расчетом при статическом или динамическом контакте упругих, вязкоупругих и пластичных тел. Она является одним из актуальных и активно развивающихся направлений исследований в современной компьютерной инженерии.

Численное моделирование элементов мостостроительных конструкций позволяет выполнять качественную и количественную оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) модели пролетных строений мостов с различной геометрической конфигурацией ее элементов для широкого набора материалов. Для удобства использования этих методов разработано множество инженерных прикладных пакетов ANSYS, Abaqus, Autodesk, AutoCAD и т.д., которые на современном уровне прочно связаны с решением задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ).

Таким образом, можно сделать заключение, что рассматриваемая тема о деформировании антифрикционного слоя скольжения опорной части из

различных полимерных материалов и композитов на их основе является актуальной. И рассматривает использование современных антифрикционных материалов в качестве прослойки опорной части, а также НДС возникающее в опорных частях пролетов мостов.

Целью дипломной работы является анализ деформационного поведения антифрикционного слоя скольжения опорной части; исследование контактных параметров антифрикционной прослойки, выполненной из разнообразного набора современных антифрикционных материалов; исследование влияния толщины полимерной прослойки опорной части и учета фрикционных свойств материала на контактные параметры и характер деформационного поведения контактного узла.

1. Анализ современного состояния научных исследований о деформационном поведении элементов опорных частей мостов

В наш век урбанизации и развития транспортной инфраструктуры количество транспортных средств увеличивается значительными темпами. При этом нагрузка на транспортно-логистические системы растет, с этим появляется ряд актуальных задач, связанных с оптимизацией работы пролетными сооружениями мостов и их элементов, в частности опорных частей, воспринимающих нагрузки от мостовых пролетов. Опорные части пролетных сооружений мостов работают в условиях сложного температурно-силового нагружения с учетом фрикционного контактного взаимодействия их элементов. В качестве основополагающей теории выступает механика контактного взаимодействия, основанная на классической задаче Генриха Герца [1], которая была решена ещё в конце XIX века. В этой задаче Г. Герцем было рассмотрено поведение двух упругих осесимметричных тел при индентировании с учетом контакта по сопрягаемым поверхностям. Результаты основывались на теории упругости и механике сплошных сред. Однако в его задаче не было рассмотрено явление адгезии. Уже позже, в середине XX века английским и австралийским физиками-механиками Д. Тейбор и Ф.П. Боуден была указана важность учета трения между поверхностями контактируемых тел. В их книге «Трение и смазка твердых тел» [2] был рассмотрен механизм действия сухого трения твердых тел, в том числе металлов и полимеров. Ими были изучены и описаны механизмы трения в различных условиях: при больших скоростях и нагрузках, при воздействии различных величин температур и т.д. Вместе с ними, советский физик И.В. Крагельский [3] создал современную молекулярно-механическую теорию трения. На её основе он сформулировал и рассмотрел, последовательные и взаимосвязанные три этапа процесса трения, такие как:

- взаимодействие поверхностей с учетом влияния среды взаимодействия;
- изменение поверхностных слоев в результате взаимодействия;
- разрушение поверхностей вследствие двух предыдущих этапов.

Приведенные выше этапы называются – триадой И.В. Крагельского. Также они считаются основополагающими многих последующих трибологических моделей при решении отдельных частных задач.

Сейчас же активно исследуются различные численные методы для решения задач контакта. В качестве численных методов достаточно активно применяются такие методы как – метод конечных элементов (МКЭ) [4], метод граничных элементов (МГЭ) [5], альтернирующий метод Шварца [6], h – адаптивный МКЭ [7]. Данные методы предпочтительны тем, что являются достаточно универсальными в программной реализации, а так же позволяют учитывать неоднородность материала и трение между контактными поверхностями. А для реализации этих методов наиболее предпочтительными пакетами являются ANSYS, ABAQUS и др.

Однако перед механиками стояла задача не только правильно учитывать трение в решаемых задачах, но и найти способ снизить его там, где это было необходимо. И здесь можно начать говорить о смазочных (антифрикционных)

материалах, свойстве материала, уменьшать силы трения и изнашивание, таком как прирабатываемость материала деталей и т.д. Само понятие как «смазочный материал» зародилось еще за несколько тыс. лет до н.э., тогда в механизмах в качестве смазки работали масла, позже животный жир и так много веков подряд. Состав таких смазок менялся, улучшался, но их открытие носило экспериментальный характер, и качество оставляло желать лучшего. Когда же открыли нефть и начали её применять в смазочных смесях, то это дало научный и технический прорыв. На сегодняшний день мы имеем большое разнообразие антифрикционных полимерных материалов и композитов на их основе. Так, например, композит на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) [8], обладает уникальным сочетанием высоким физико-химических и механических характеристик, а также имеет очень низкий коэффициент трения, что для антифрикционного материала очень важное качество. Но многими учеными отмечается недостаток информации о механических характеристиках и моделях поведения антифрикционных полимеров, что значительно сужает их использование в узлах, работающих в рамках фрикционного взаимодействия. Большинство механических характеристик получают из натуральных экспериментов.

В частности, актуальными направлениями исследования считаются выбор и идентификация математических моделей поведения таких материалов, отражающих их термомеханические, фрикционные и физико-механические особенности. Изучается влияние внедрения смазочных материалов в антифрикционные полимерные прослойки на их контактные характеристики и изменения зоны контакта [9 – 10]. Для того чтобы изучения характеристик происходило правильно, то надо достаточно точно обрабатывать экспериментальные данные [11]. К слову сказать, так же проводят исследования о вторичном использовании полимеров, а точнее приготовление антифрикционных полимерных композиционных материалов из полимерных отходов. И улучшение их свойств с помощью различных модификаций и обработок [12].

Улучшения характеристик антифрикционных материалов получают внедрением в их состав добавочных элементов [13 – 15] или армированием тканями [16]. Так же существуют исследования материалов на более высоких уровнях – молекулярный уровень, наноуровень, микроуровень [17 – 18]. Исследователи получили зависимость триботехнических свойств антифрикционных полимерных композиционных материалов от разных масштабных уровней.

Такие антифрикционные полимерные материалы используют в различных узлах трения и конструкциях, как например: механические передачи, тормозные колодки, механизмы двигателя внутреннего сгорания, поршни [19], подшипники скольжения с прослойкой из полимерного композитного материала [20 – 21], соединение кости и суставного хряща [22], протез колена, автодорожное покрытие [23], узлах трения коммунального хозяйства [24], опорных частях пролетных строений мостов и мостовых сооружений [25].

Так как строительством мостов человечество занимается еще с давних времен, то на сегодня оно является одной из самых развитых отраслей промышленности. А с ростом числа транспортных средств и потребности сократить время на передвижения из пункта А в пункт Б возникает потребность не только в строительстве магистралей, но и мостовых сооружений. Кроме этого нельзя забывать, что уже построенные мостовые конструкции надо поддерживать в эксплуатационном состоянии. Поэтому расчет мостовых сооружений и их элементов конструкции на сегодняшний день является достаточно актуальной задачей.

Существует множество работ направленных на анализ работы элементов мостовых конструкций. В частности, такими работами являются исследования деформационных швов мостовых сооружений и повышение их долговечности [26]. Также часть зарубежных работ по физическому моделированию деформационных швов мостовых сооружений рассмотрено в работе [27]. Нельзя забывать про погодные-климатические воздействия и для улучшения безопасности дорожного движения, срока службы, эксплуатационных характеристик проезжей части мостов рассматриваются системы, и элементы отвода ливневых вод [28]. Кроме того исследуется защита мостовых конструкций от атмосферной коррозии [29].

Исследуется влияние сейсмических возмущений на конструкцию [30] и способы активного реагирования на возникновение от них возмущений в пролётах мостов как Principal Component Analysis [31], а для снижения вибрации конструкций мостов автомагистралей оснащают как пассивной системой изоляции, так и полуактивными устройствами управления [32]. Исследуются бесконтактные способы мониторинга состояния мостов методом Digital Image Correlation [33].

В частности, проводятся анализы защиты конструкций от возникающих на них пожарах [34], от выделившейся энергии из-за столкновения машин [35], изучают колебания, возникающие в неразрезном пролетном строении моста под действием подвижной нагрузки путем экспериментально-теоретического исследования и численного моделирования [36 – 37]. И, кроме этого, изучают аэроупругую устойчивость двух близ лежащих пролетных строений в условиях взаимной интерференции [38]. Разрабатываются новейшие строения мостов, которые бы удовлетворяли таким требованиям как – быстрое, экономическое строительство и защита окружающей среды [39].

Не последнее место в научных исследованиях занимает и анализ работы опорных частей мостов. Исследование мостовой опорной части выполненной из стеклопластика методом голографической интерферометрии во встречных пучках описанное в [40]. Проведение экспериментальных и численных исследований для оценки напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций армированных полимеркомпозитной арматурой [41]. Экспериментальные исследования применения внешнего армирования композиционными материалами для изгибаемых железобетонных элементов [42]. Всё это отображает заинтересованность мостостроительных организаций и

НИИ в экспериментальных исследованиях элементов транспортно-логистических систем и значительный масштаб задач.

Существует ряд работ, направленный на исследование с использованием численных методов деформационного поведения элементов мостов. Как, например, моделирование износа элементов конструкции проезжей части мостовых сооружений с помощью окрестностных моделей [43]. В [44] реализовано исследование о возникновении дополнительных горизонтальных реакций влияющих на НДС пролетных строений мостов при вертикальном взаимодействии нагрузки в неподвижных опорных частях. Численным методом ортогональной прогонки была решена задача о напряженно-деформированном состоянии конструкции мостовых элементов со стенками переменной толщины вдоль длины [45]. Изучается новый способ усиления конструкциями из композиционных материалов железобетонных мостовых пролетных строений [46].

Часто в рамках научных исследований рассматриваются основные проблемы отечественного мостостроения, такие как защита мостов от коррозии, сопряжения мостов с насыпями, технологии устройства опорных частей мостов, а также деформационных швов. Предлагают способы устранения этих проблем и проблем с повышением долговечности мостов [47]. В связи с этим исследуются новые подходы обнаружения трещин и устранения неполадок конструкции [48 – 49], а также совершенствуется сама технология мостостроения [50]. Проводятся исследования временных вертикальных нормативных нагрузок на пролеты мостовых сооружений, которые используются в качестве образца при модернизации отечественных норм и предлагают свои способы устранения недостатков [51–52]. Численное исследование с помощью прикладного пакета Abaqus, проводил авторский коллектив Кривицкий П.В., Матвеевко Н.В.: они рассматривали железобетонные балки в предварительно напряженном состоянии при различных пролетах среза с помощью МКЭ, и получили результаты близкие к экспериментальным данным [53].

Одним из актуальных направлений исследований является анализ деформационного поведения опорных частей мостовых сооружений и их элементов, как несущих узлов транспортно-логистических систем, постоянно воспринимающих нагрузки от мостовых пролетов, в случае сейсмической активности [54], возникают напряжения от различных погодных условий и т.д. Проводятся исследования влияния конструкционного оформления элементов опорных частей мостов. В частности одним из примеров можно представить изучение плоских опорных частей мостов [55]. Также рассматривают опорные части мостов с прослойкой, выполненной из резины [56].

Важен не только правильный подход к безремонтным срокам работы опорных частей [57], но и повышение их долговечности по средствам оптимального выбора материалов антифрикционных слоев скольжения в зависимости от температурно-силовых воздействий, которые они воспринимают. Исследование сферических опорных частей [58–59], в которых в качестве антифрикционной прослойки используют современные полимерные

материалы и композиты на их основе, является одной из актуальных задач мостостроения.

На сегодняшний день многие мостостроительные предприятия ведут активные разработки, направленные на оптимизацию работы конструкций опорных частей. Это такие предприятия как: ООО «АльфаТех», ОАО «Институт Гипростроймост», ПАО «Мостотрест» и другие.

Для примера можно привести такие современные задачи как рассмотрение причин разрушения мостовых сооружений [60 – 61] связанных с несущими элементами: разрушение вызывает перегрузка несущих конструкций, разрушения, вызванные расстройством соединений, потерей устойчивости элементов из-за недостаточной надежности и т. д. Так же отмечается увеличение работ, связанных с анализом конструктивных особенностей опорных частей транспортно-логистических систем [62 – 63], а также работ о пролетных строениях мостов [64].

В частности, в опорных частях пролетных строений мостов Труфанов Н. А. и Каменских А.А. [65] рассмотрели напряженное состояние сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала и установили влияние геометрии конструкции на распределение участков с разным типом взаимодействия в зоне контакта, величину и параметры контактных характеристик полимерных антифрикционных материалов.

2. Математическая постановка

Математическая постановка задачи о контакте элементов сферической опорной части реализуется в рамках теории упругости и включает в себя:

- уравнения равновесия

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = 0; \vec{x} \in V \quad (2.1)$$

- геометрические соотношения

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla u + (\nabla u)^T + \nabla u \cdot (\nabla u)^T \right), \vec{x} \in V \quad (2.2)$$

- физические соотношения

$$\hat{\sigma} = \lambda I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2\mu \hat{\varepsilon}, \vec{x} \in V_1 \cup V_2 \cup V_3 \quad (2.3)$$

где λ и μ – параметры Ламе, $\hat{\sigma}$ – тензор напряжений, $\hat{\varepsilon}$ – тензор деформаций, \vec{u} – вектор перемещений, \vec{x} – радиус-вектор произвольной точки, $I_1(\hat{\varepsilon})$ – первый инвариант тензора деформаций, \hat{I} – единичный тензор, V_1 – область, верхней плиты со сферическим сегментом, V_2 – область, нижней плиты со сферическим вырезом, V_3 – область, занимаемая упругопластической антифрикционной полимерной прослойкой, $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$ – расчетный объем.

Для описания поведения полимерного материала выбрана деформационная теория упругопластичности, физические соотношения которой имеют вид [66]:

$$\hat{\sigma} = \frac{2\sigma_u}{3\varepsilon_u} \left(\hat{\varepsilon} - \frac{1}{3} I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} \right) + K I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I}, \vec{x} \in V_3 \quad (2.4)$$

где $\sigma_u = \sqrt{3I_2(D_{\hat{\sigma}})}$ – интенсивность тензора напряжений, $I_2(D_{\hat{\sigma}})$ – второй инвариант девиатора тензора напряжений $D_{\hat{\sigma}}$, K – объемный модуль упругости, $\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_2(D_{\hat{\varepsilon}})}$ – интенсивность тензора деформаций, $I_2(D_{\hat{\varepsilon}})$ – второй инвариант девиатора тензора деформаций $D_{\hat{\varepsilon}}$, $\sigma_u = \Phi(\varepsilon_u)$ – функциональная зависимость, определяемая диаграммой деформирования материала прослойки при одноосном напряженном состоянии.

Система уравнений (1) – (4) дополнена граничными условиями на поверхностях контакта $S_K = S_{K_1} \cup S_{K_2} \cup S_{K_3}$. На S_K два тела с условными номерами 1 – 2 вступают в контактное взаимодействие с учетом трения по сопрягаемым поверхностям, коэффициент трения постоянный 0,04 (соответствует справочному значению).

Контактные граничные условия:

- проскальзывание с трением: для трения покоя

$$\vec{u}^1 = \vec{u}^2, \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \sigma_{n\tau_1}^1 = \sigma_{n\tau_1}^2, \sigma_{n\tau_2}^1 = \sigma_{n\tau_2}^2, \quad (2.5)$$

при этом $\sigma_n < 0$, $\sigma_{n\tau} < \mu \sigma_n$,

- для трения скольжения

$$u_n^1 = u_n^2, u_{\tau_1}^1 \neq u_{\tau_1}^2, u_{\tau_2}^1 \neq u_{\tau_2}^2, \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \sigma_{n\tau_1}^1 = \sigma_{n\tau_1}^2, \sigma_{n\tau_2}^1 = \sigma_{n\tau_2}^2, \quad (2.6)$$

при этом $\sigma_n < 0$, $\sigma_{n\tau} = \mu\sigma_n$,

– отлипание

$$\left| u_n^1 - u_n^2 \right| \geq 0, \sigma_{n\tau_1} = \sigma_{n\tau_2} = \sigma_n = 0, \quad (2.7)$$

– полное сцепление

$$\bar{u}^1 = \bar{u}^2, \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \sigma_{n\tau_1}^1 = \sigma_{n\tau_1}^2, \sigma_{n\tau_2}^1 = \sigma_{n\tau_2}^2, \quad (2.8)$$

где μ – коэффициент трения, τ_1, τ_2 – условные обозначения координатных осей, лежащих в плоскости, касательной к поверхности контакта, u_n – перемещения по нормали к соответствующей контактной границе, u_{τ_1}, u_{τ_2} – перемещения в касательной плоскости, σ_n – напряжение по нормали к контактной границе, $\sigma_{n\tau_1}, \sigma_{n\tau_2}$ – касательные напряжения на контактной границе, $\sigma_{n\tau}$ – величина вектора касательных контактных напряжений.

ООО «АльфаТех» в рамках работ по оптимизации конструкций сферических опорных частей провел ряд исследований физико-механических, фрикционных и реологических свойств широкого набора полимерных материалов и композитов на их основе (более 30 материалов). Исследования проводились на базе Института механики сплошных сред УрО РАН д.ф.-м.н. Адамовым А.А. В результате серии натурных экспериментов был получен набор физико-механических характеристик материалов и ряд закономерностей их деформационного поведения. По результатам экспериментов определены касательный модуль M и модуль упругости E , согласно [67] можно вычислить другие упругие константы изотропного упругого тела, которые выражаются через измеренные модули. Коэффициент Пуассона определим по формуле:

$$\nu = E/2\mu - 1 \quad (2.9)$$

$$\text{где } \mu = E/8 \left(1 + 3M/E - \sqrt{(1 + 3M/E)^2 - 16M/E} \right).$$

При анализе экспериментальных данных в рамках первого приближения для описания модели поведения антифрикционных материалов выбрана деформационная теория упругопластичности в условиях активного нагружения.

Из широкого набора испытанных материалов для анализа влияния физико-механических характеристик материалов относительно тонкого сферического слоя скольжения выбрано 6 полимеров и композитов на их основе (рис. 2.1).

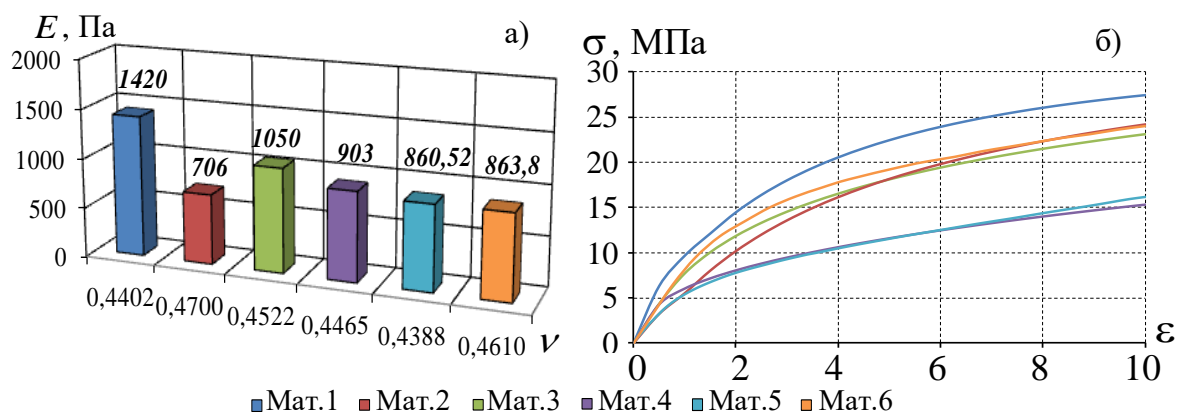


Рис. 2.1. Физико-механические свойства антифрикционных материалов:
 а) модуль Юнга и коэффициент Пуассона; б) диаграмма напряжения-деформации

В рамках материалов антифрикционной прослойки рассмотрено: сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) наполненный углеродом (мат. 1); СВМПЭ производства России (мат. 2); СВМПЭ производства Германии (мат. 3); антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта с дендритными и сферическими бронзовыми включениями, и дисульфидом молибдена (мат. 4 и 5 соответственно); модифицированный фторопласт (мат. 6).

3. Анализ контактного взаимодействия сферического стального штампа с полупространством из современных антифрикционных полимерных материалов

Одной из основополагающих задач механики контактного взаимодействия выступает работа Генриха Герца. Данная работа рассматривает деформирование жестким сферическим штампом полупространство. В данной главе рассмотрим численное и аналитическое решение задачи. Проведем оценку сходимости, анализ полупространства выполненного из упругого и упругопластического материала. Рассмотрим влияние учета коэффициента трения на контактные параметры.

3.1. Аналитическое решение задачи Герца

В настоящей работе рассмотрим аналитическое решение на примере штампа, выполненного из стали и полупространства из полимерных антифрикционных материалов.

На рисунке 3.1.1 представлена модель контактной задачи сферического штампа с пространством.

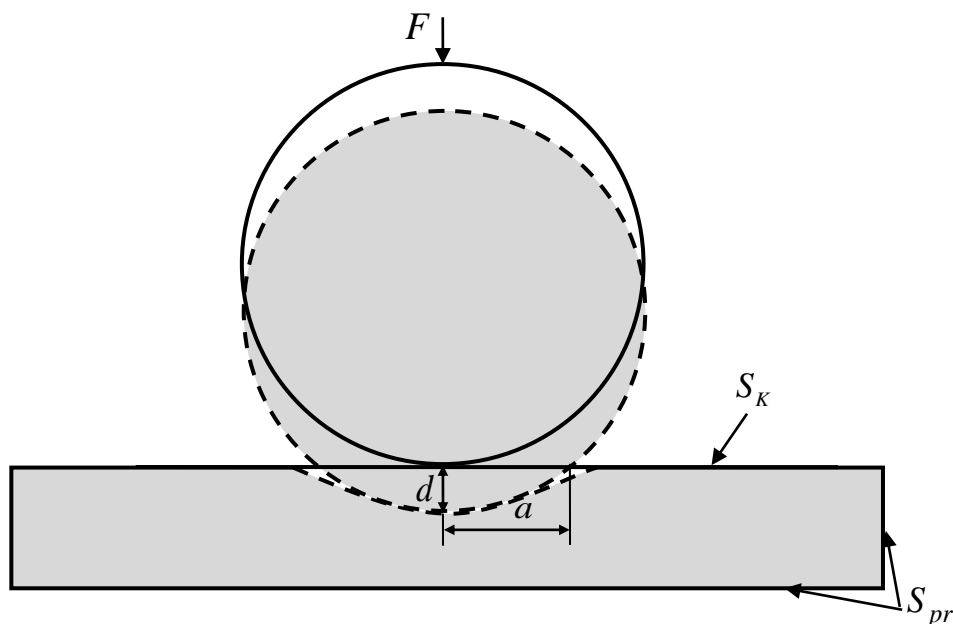


Рис. 3.1.1. Контакт сферического штампа с пространством

Можно заметить, что d – глубина проникновения штампа в полупространство и a радиус области контакта. Данные величины можно отнести к деформационным характеристикам контактного узла, которые в свою очередь являются решениям задачи Герца. При этом a и d связаны следующей зависимостью:

$$a = \sqrt{Rd}, \quad (3.1)$$

где R – радиус сферического индентора.

В формуле (3.1) присутствуют два неизвестных параметра, для определения глубины вдавливания d сферы радиуса R в полупространство можно определить из формулы:

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \quad (3.2)$$

где $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$, ν_1 и ν_2 – коэффициенты Пуассона шара и пространства соответственно, E_1 и E_2 – модули упругости соответственно, F – сила индентирования.

Контактное давление, определяется по формуле:

$$P_K = P_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

где $P_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left(\frac{d}{R}\right)^{\frac{1}{2}}$.

Вычислим параметры зоны контакта для данной задачи. Радиус жесткого сферического стального штампа примем $R=1$ м, а полимерное пространство рассмотрим последовательно для всего набора материалов. Силу индентирования сферического стального штампа в полупространство примем $F=1,5$ МН. На рисунке 3.1.2. представлено полученное аналитическое контактное давление для всех материалов.

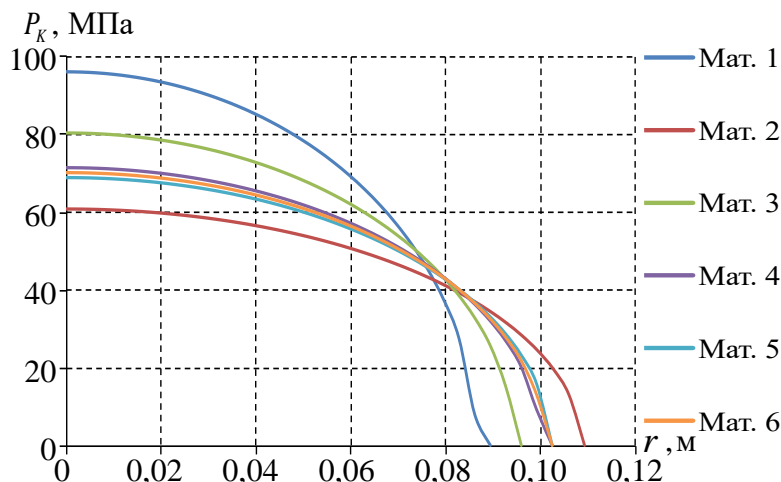


Рис. 3.1.2. Аналитическое решение задачи Герца

Проводя анализ результатов, можем заметить, что максимальное контактное давление и минимальные радиус контакта наблюдается у мат. 1. Обратная ситуация наблюдается у полупространства, выполненным из мат. 2. Эти результаты говорят нам о том, что на полупространстве из мат. 2 мы наблюдаем более равномерное распределение контактного давления нежели на полупространстве выполненным из материала 1. Мат. 4 – 6 имеют схожий характер распределения контактного давления. Если дать среднюю оценку результатов, то радиус контакта равен $\approx 0,103$ м, а уровень контактного давления – 73,7 МПа.

На рисунке 3.1.3. можно наблюдать параметры зоны контакта a и d .

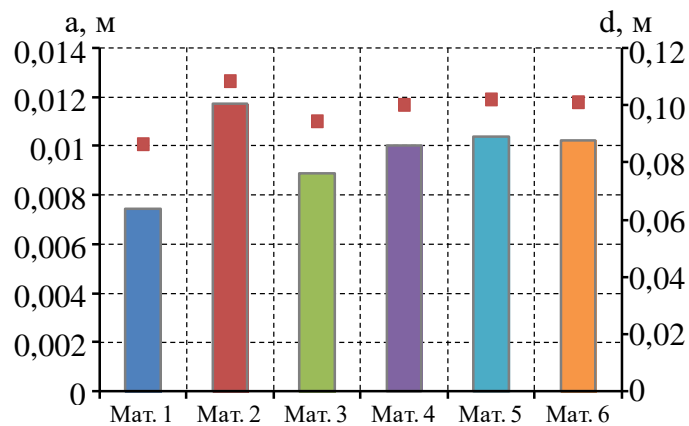


Рис. 3.1.3. Параметры зоны контакта: а – гистограмма; d – маркеры

Как хорошо заметно на рис. 3.1.3. полупространство, выполненное из мат. 2 больше всех подвержен деформации. Соответственно для мат. 1 мы наблюдаем обратный эффект. Что касается мат. 4 – 6, они обладают незначительными отличиями по радиусу площадки контакта. А мат. 3 показывает средние результаты параметров зоны контакта.

Далее рассмотрим численную реализацию задачи Герца и проведем оценку сходимости результатов.

3.2. Численная реализация задачи Герца без учета фрикционных свойств в рамках теории упругости

Задача Герца численно была реализована в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. В расчетах были использованы четырехугольные конечные элементы (КЭ), с двумя степенями свободы в каждом узле (перемещения). Неподалеку от области контактного взаимодействия задавалось градиентное сгущение КЭ. Для реализации контакта типа поверхность-поверхность задавался двух узловой плоский элемент на границе контактного взаимодействия.

На рис. 3.2.1. представлена реализованная модель задачи Герца.

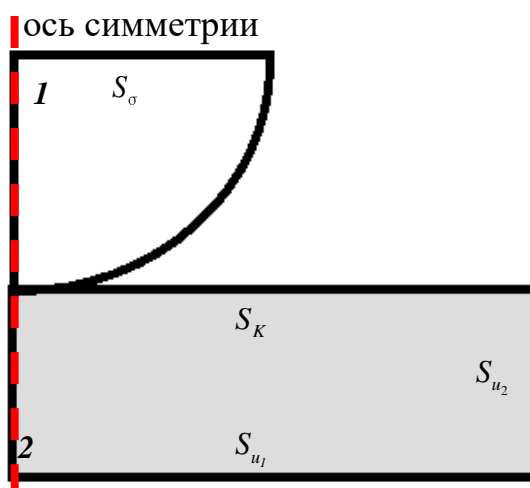


Рис. 3.2.1. Модель задачи Герца

Сферический индентор моделируется в качестве четверти окружности (1), полупространстве в качестве квадратной области (2). Учет отброшенных частей задаётся в форме граничных условий.

Математическая постановка (2.1)–(2.8) дополняется граничными условиями: на S_σ приложена постоянная сила индентирования, запрещен изгиб; на S_{u_1} запрещены вертикальные перемещения; на S_{u_2} запрещены горизонтальные перемещения; на S_K учтены контактные граничные условия.

Оценка сходимости численного решения задачи Герца к аналитическому от изменения степени дискретизации системы проходила для полупространства на основе мат. 6. Она представлена на рис. 3.2.2.

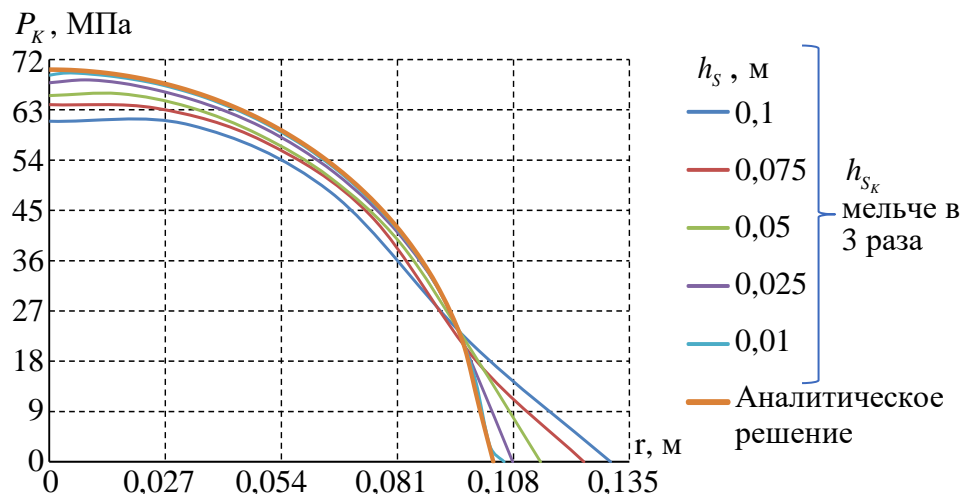


Рис. 3.2.2. Сходимость численного решения задачи

Можем заметить, что при увеличении степени дискретизации системы численное решение стремится к аналитическому. Для дальнейшей численной реализации будем использовать КЭ сетку с шагом 0,01 на основной области полупространства и сферического штампа. КЭ сетка вблизи области контактного взаимодействия меньше в 3 раза. С использованием такой КЭ сетки мы будем получать хорошее качественное и количественное соответствие результатам, полученным за счет аналитического решения задачи.

Для выбранного разбиения КЭ сетки проведем анализ соответствия результатов численного и аналитического решения задачи для всего набора рассматриваемых материалов. Данные результаты представлены на рис. 3.2.3.

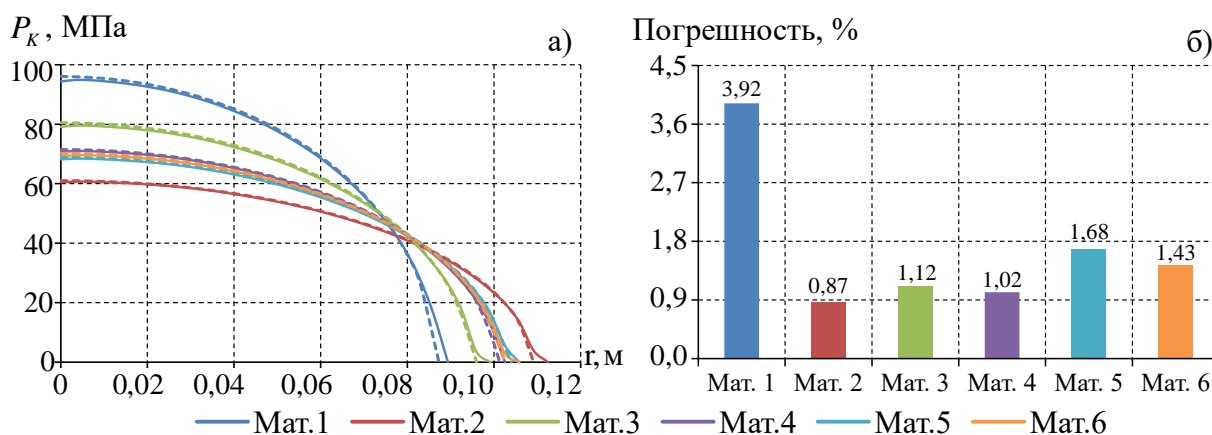


Рис. 3.2.3. Сравнение аналитического и численного решения задачи для всех материалов: а) контактное давление; б) погрешность численного решения

Наибольшее значение погрешности наблюдается у полупространства из мат. 1. В среднем оно превышает другие значения погрешности на $\approx 2,6$ %. Для

данного материала получились такие значения погрешности от того, что он требует дополнительных экспериментальных исследований, что напрямую связано с его деформационным поведением в экспериментах с различными историями длительного многоступенчатого нагружения. В среднем для всех материалов погрешность результатов не превышает $\approx 1,7\%$.

3.3. Численная реализация задачи Герца с учетом фрикционного контакта в рамках теории упругости

При анализе сходимости численного решения к аналитическому не учитывалось трение по сопрягаемым поверхностям. Рассмотрим численную реализацию задачи Герца с учетом фрикционного контактного взаимодействия в рамках упругой постановки поведения полупространства. Коэффициент трения между сопрягаемыми поверхностями для всех материалов полупространства равен 0,04, что соответствует справочному значению. Проведя численную реализацию задачи Герца в ANSYS, были получены контактное давление и контактное касательное напряжение (рис. 3.3.1).

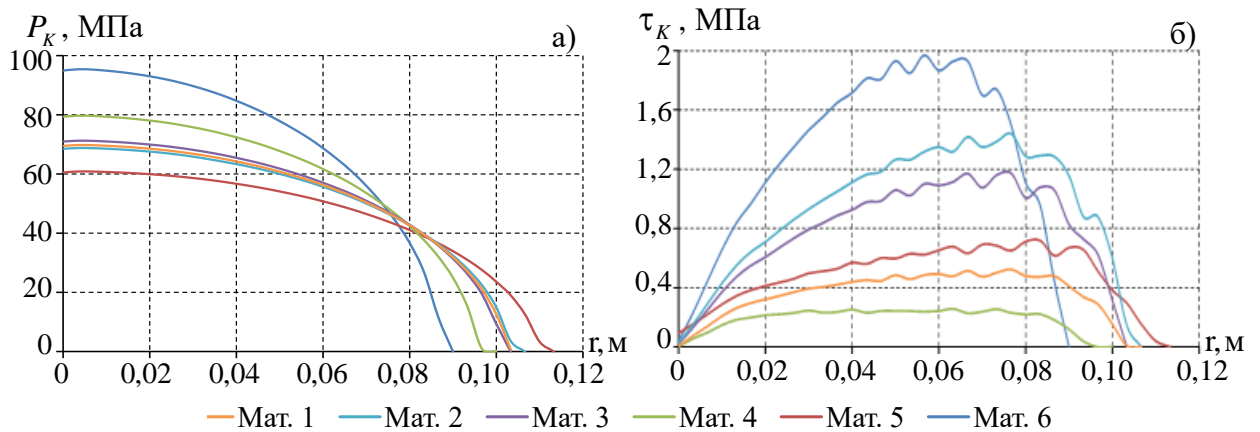


Рис. 3.3.1. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) при коэффициенте трения 0,04

Учет трения в контактном узле имеет значительное влияние на контактное касательное напряжение, так как при контакте без учета трения данный параметр равен нулю по всей границе контакта. Проведя анализ полученных данных, можем сказать, что уровень контактного касательного напряжения в 50 раз ниже, чем уровень контактного давления. На рис. 3.3.2. представлена сравнительно диаграмма значений контактного давления без учёта и с учётом фрикционного контактного взаимодействия.

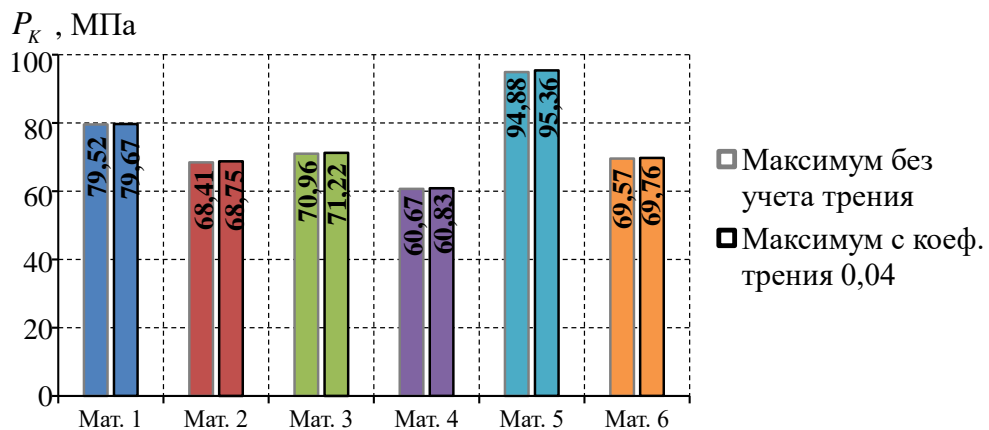


Рис. 3.3.2. Сравнения P_K для моделей с учетом и без учета трения

Выполнив сравнение контактного давления моделей без учета и с учетом фрикционных свойств материалов, можно сделать вывод, что учет фрикционного контактного взаимодействия незначительно влияет на контактное давление (в пределах 0,0001%).

Далее рассмотрим, как учет упругопластического поведения материалов полупространства влияет на контактные параметры.

На примере одного материала (мат. 3) покажем напряженно-деформированное состояние контактного узла. На рис. 3.3.3 показана интенсивность напряжений и деформаций.

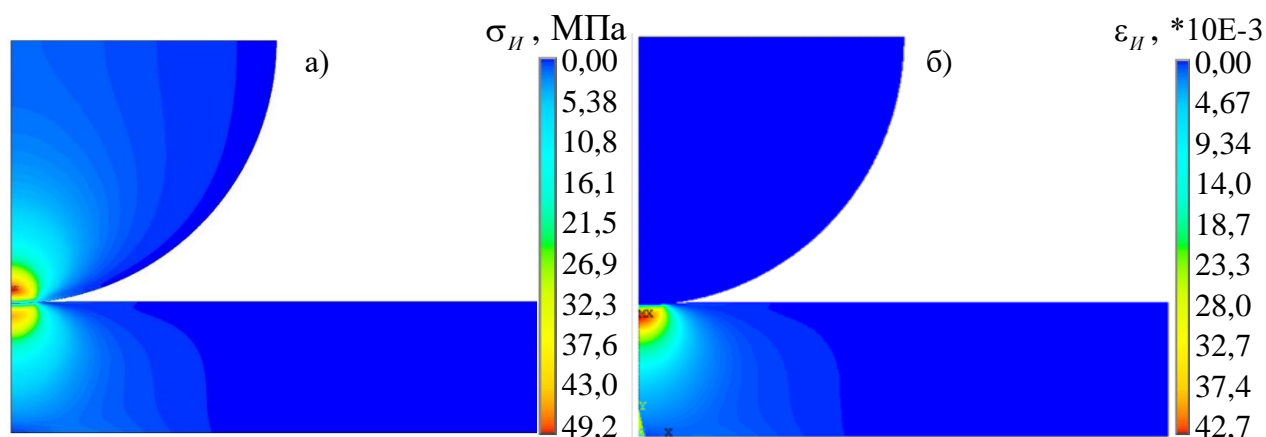


Рис. 3.3.3. Интенсивность напряжений (а) и деформаций (б) на примере мат. 3

Можно отметить, что максимальный уровень интенсивности напряжений наблюдается как в полупространстве, так и в сферическом инденторе симметрично относительно поверхности контакта. Если же говорить об интенсивности деформаций, то наибольший уровень наблюдается в полупространстве вблизи зоны контакта.

В таблице 3.3.1 представлены результаты по максимальным значениям интенсивности напряжений и деформаций, полученных в полупространстве для всего набора рассматриваемых материалов.

Таблица 3.3.1

Максимальная интенсивность напряжений/деформаций полупространств из разных материалов

№ материала п/п	max σ_{II} , МПа	max $\varepsilon_{II} \cdot 10^{-3}$
1	58,4	38,2
2	37,4	49,0
3	49,2	42,7
4	43,6	45,1
5	42,0	45,9
6	42,8	45,8

Наибольшее значение интенсивности деформаций при наименьшем значении интенсивности напряжений наблюдается у полупространства из мат. 2. Для мат. 1 мы наблюдаем обратную картину, наибольшие значения интенсивности напряжений и наименьшие значения интенсивности деформаций. У материалов 4–6 наблюдаются малые различия в максимальных

уровнях интенсивности напряжений (в среднем около 2,5 %) и деформаций (в среднем около 1,6 %), данные материалы имеют одну основу – фторопласт.

3.4. Численная реализация задачи Герца с учетом фрикционного контакта в рамках деформационной теории упругопластичности

Результаты численного моделирования задачи Герца с учетом упругопластических свойств материалов полупространства на примере контактного давления и контактного касательного напряжения представлены на рис. 3.4.1.

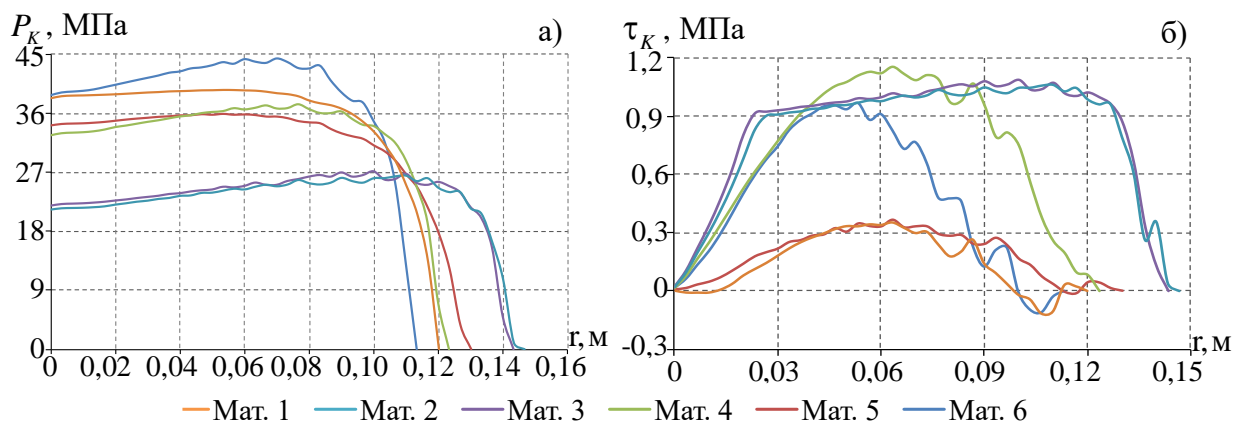


Рис. 3.4.1. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б)

Можно отметить, что учет упругопластического поведения материала оказал значительное влияние на характер распределения контактных параметров по площадке контакта. Максимальное контактное давление сместилось ближе к краю контактной области. Наблюдаются небольшие возмущения (скачки) контактного давления по всей границе контакта, что связано с проявлением упругопластических свойств материалов полупространства. Уровень контактного давления снизился более чем в 2 раза. Контактное касательное напряжение так же отличается от упругой постановки задачи. У ряда материалов проявились зоны отрицательных значений контактного касательного напряжения. Уровень контактного касательного напряжения приблизительно в 1,5 раза ниже, чем при упругой постановке задачи.

Проявление пластических свойств материалов полупространства оказывает влияние на параметры зоны контакта. Для примера на рис. 3.4.2 представлен характер распределения пластических деформаций полупространства из мат. 2.



Рис. 3.4.2. Характер распределения интенсивности пластических деформаций

Из рис. 3.4.2 можно отметить, что максимальные пластические деформации наблюдаются вблизи зоны контакта. Рассмотрим, максимальные значения пластических деформаций для всех материалов (рис. 3.4.3, табл. 3.4.1) полупространства.

Таблица 3.4.1.

Интенсивность пластических деформаций

№ материала п/п	$\max \varepsilon_{II_p} \cdot 10^{-3}$
1	33,7
2	30,7
3	36,7
4	46,8
5	48,0
6	32,0

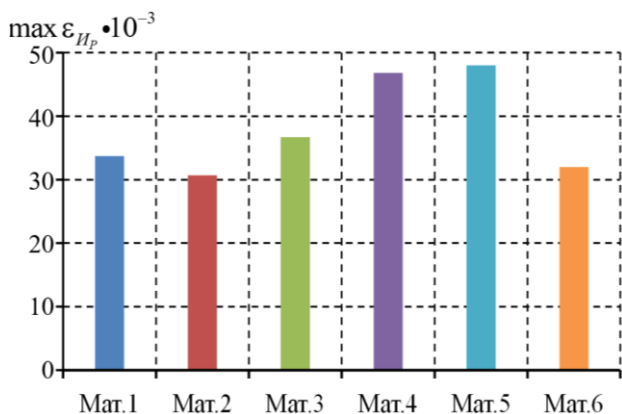


Рис. 3.4.3. Максимальные пластические деформации

Самый большой уровень пластических деформаций наблюдается у композиционных материалов 4–5, минимальный – у мат. 2. У остальных рассмотренных материалов уровень пластических деформаций больше, чем у материала 2 в среднем в пределах 12 %.

3.5. Сравнение результатов численного моделирования задачи Герца в упругой и упругопластической постановке задачи

Выполним сравнение результатов решения по параметрам зоны контакта, полученным при решении задачи Герца в рамках теории упругости и в рамках деформационной теории упругопластичности.

Сравним максимальное контактное давление для двух постановок задач. На рис. 3.5.1 представлены диаграммы максимальных и средних значений контактного давления для обеих постановок задач.

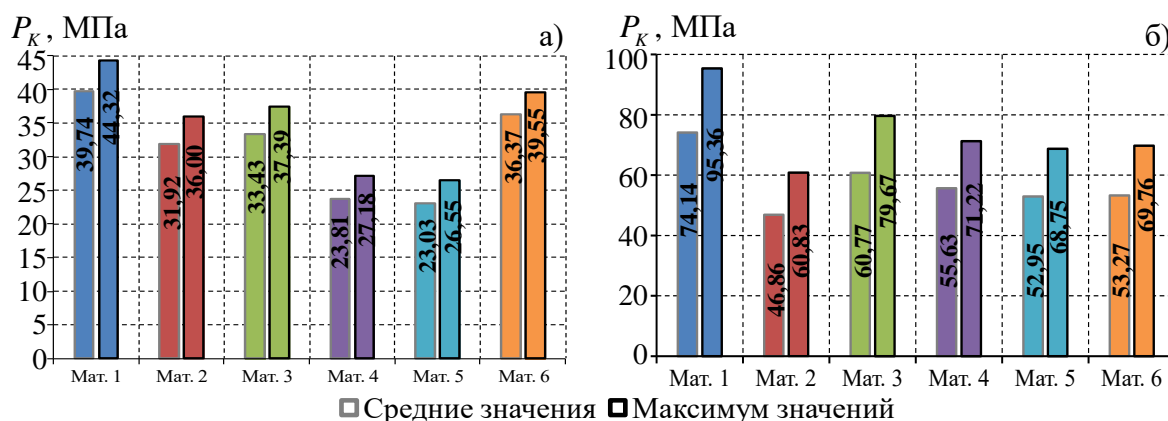


Рис. 3.5.1. Значение максимальных и средних значений при упругопластической (а) и упругой (б) постановках задачи

Можно сделать вывод, что при учете упругопластического поведения материалов полупространства максимальный уровень контактного давления ниже (~50 %), чем при упругом поведении материала полупространства.

Средний уровень контактного давления с учетом упругопластического поведения материала полупространства дает нам результаты в среднем ниже на 45 %.

Значительное влияние на уровень контактного давления может оказывать площадь зоны контакта. На рис. 3.5.2 представлены диаграммы значений радиуса площадки контакта.

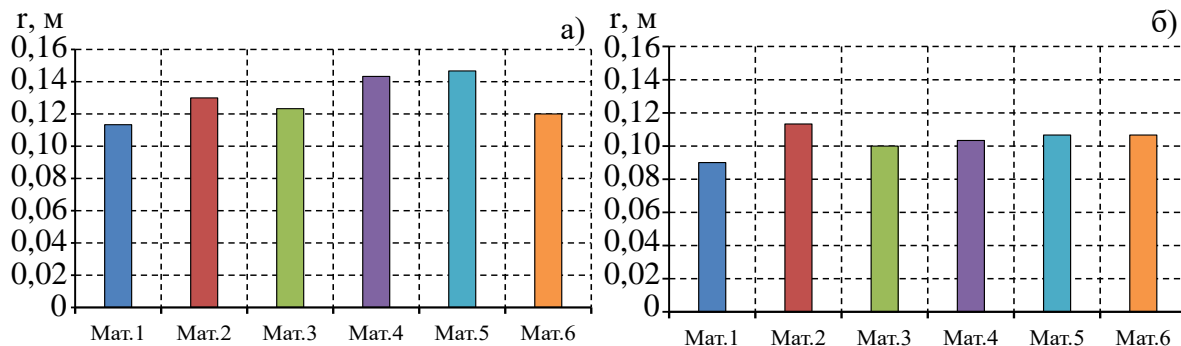


Рис. 3.5.2. Значение радиуса площадки контакта при упругопластической (а) и упругой (б) постановках задачи

Учет упругопластического поведения материала повлиял и на радиус контактной площадки. Из-за эффектов пластичности материалов радиус контакта увеличился в среднем на 25 %. Из этого можем сделать вывод, что при одинаковой нагрузке контактное давление распределено по большей площади контакта, чем в упругом поведении материала, что и способствует снижению его уровня.

3.6. Выводы по главе

Выполнена численная реализация задачи Герца о деформировании полупространства из полимерных материалов и композитов на их основе жестким стальным сферическим штампом:

- Установлено хорошее количественное и качественное соответствие результатов решения контактной задачи в программном комплексе ANSYS с аналитическим решением задачи (не более 4 %).
- Выполнена оценка деформационного поведения контактного узла по максимальному уровню интенсивностей напряжений и деформаций.
- Провели сравнение упругой и упругопластической постановки задачи. Вывели, что в упругой постановке задачи зона контакта меньше, чем в упругопластической, а это ведет к тому, что средний уровень контактного давления выше, чем в упругопластической постановке, примерно ~ на 45%.

4. Деформирование антифрикционного слоя скольжения опорной части из разных полимерных материалов и композитов на их основе

При производстве сферических опорных частей пролетных строений мостов по данным ООО «АльфаТех» стандартная толщина относительно тонкого полимерного слоя скольжения составляет 4 мм. На настоящий момент фирмой производителем рассматривается возможность увеличения толщины антифрикционной прослойки и ее влияние на напряженно-деформированное состояние сферической опорной части в целом и зоны контакта в частности. Работа направлена на численный анализ влияния толщины антифрикционной прослойки на деформационное поведение сферической опорной части. При этом была выполнена серия численных экспериментов для трёх толщин антифрикционных прослоек 4, 6 и 8 мм, для прослоек из 6 современных антифрикционных полимеров и композитов на их основе.

4.1. Постановка задачи контакта элементов сферической опорной части

Анализ деформационного поведения элементов сферической опорной части (рис. 4.1.1) выполнен в рамках реализации фрикционного контактного взаимодействия верхней плиты со сферическим сегментом (1) и нижней плиты со сферическим вырезом (2) опорной части через упругопластическую полимерную прослойку (3) при номинальной вертикальной нагрузке 1000 кН. Рассмотрена модель сферической опорной части Л-100 производства ООО «АльфаТех» (г. Пермь).

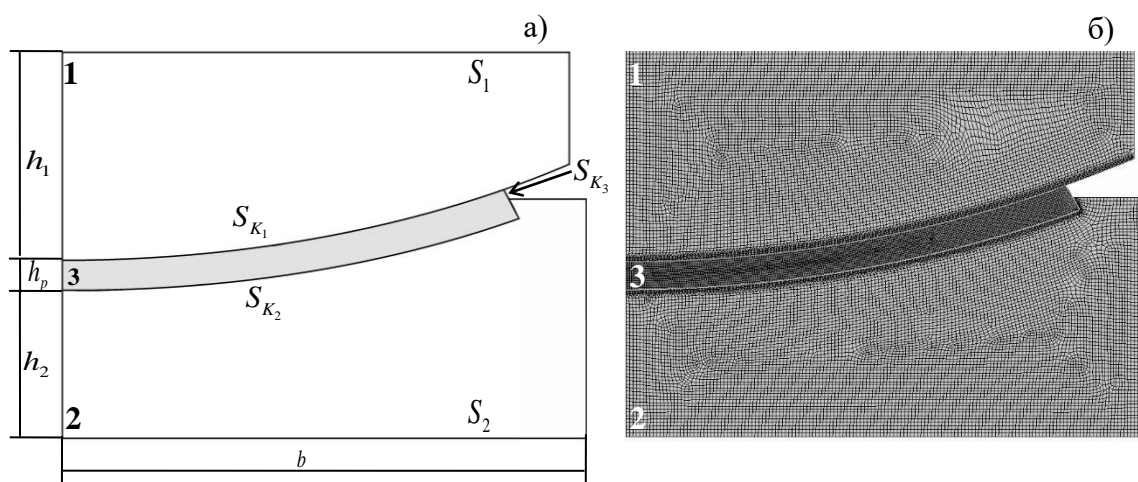


Рис. 4.1.1. Расчетная схема сферической опорной части (а), вид КЭ сетки (б)

В рамках анализа влияния геометрической конфигурации конструктивных элементов сферической опорной части толщина антифрикционной полимерной прослойки h_p варьируется от 4 до 8 мм, минимальная высота нижней плиты со сферическим вырезом варьируется в зависимости от толщины прослойки от $h_2 = 20$ мм до $h_2 = 16$ мм соответственно. Максимальная высота нижней плиты уменьшается на приращение толщины антифрикционной прослойки. При этом максимальная высота верхней плиты и максимальная ширина конструкции не изменяются и равны $h_1 = 30$ мм и $b_k = 2b = 155$ мм соответственно.

Математическая постановка (2.1)–(2.8) дополняется граничными условиями: на S_1 приложена постоянная сила индентирования и запрещен изгиб; на S_2 запрещены вертикальные перемещения.

Расчетная схема была реализована в программном комплексе ANSYS, методом конечных элементов (МКЭ) с использованием четырехугольной конечно-элементной сетки, с двумя степенями свободы в каждом узле. Труфановым Н.А., Адамовым А.А. и Каменских А.А. проводился анализ зависимости численного решения задачи от степени дискретизации системы. Был определен оптимальный размер элементов по толщине полимерной прослойки: размер элемента 0,25 мм. Верхняя и нижняя плита на основном объеме материала разбивается на конечно-элементную сетку с размером элемента в 2 раза больше элемента прослойки – 0,5 мм, со сгущением элементов к области контакта. На границе контакта задавался двух узловой плоский элемент, который позволяет реализовать контактное взаимодействие типа поверхность – поверхность.

4.2. Анализ параметров контактного взаимодействия

Для оценки влияния толщины полимерной антифрикционной прослойки рассмотрим в начале стандартную прослойку, толщиной 4 мм. В первую очередь рассмотрим поверхность S_{K_1} , на которой можно наблюдать поворот сферического сегмента верхней плиты. На рисунке 4.2.1 представлены возникающие на ней контактные параметры антифрикционной полимерной прослойки.

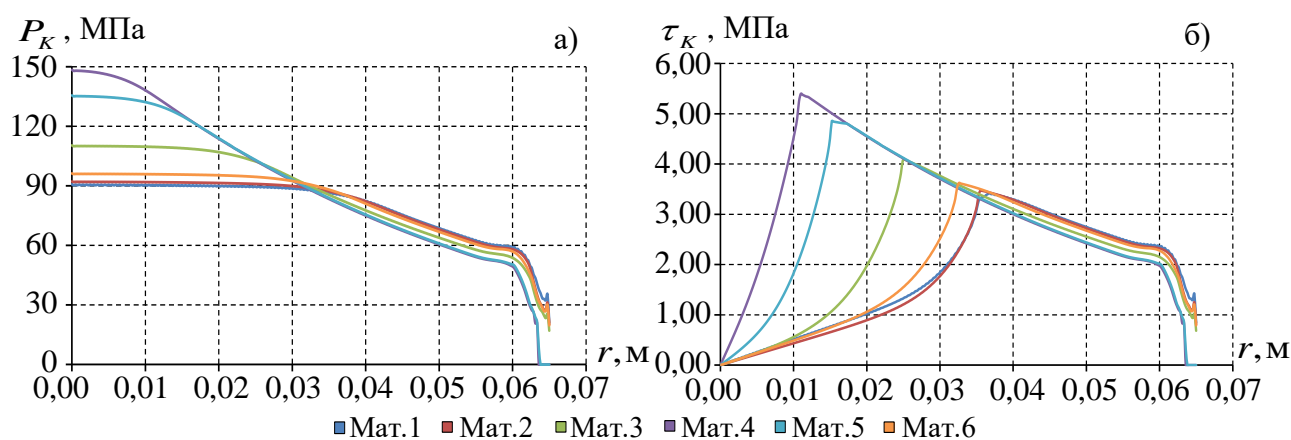


Рис. 4.2.1 Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_1} при $h_p = 4$ мм

Наибольшее контактное давление возникает на материалах 4 – 5, что связано с минимальной площадью контактного сцепления поверхностей. Материалы 1, 2 и 6 обладают малыми отличиями: максимальное контактное давление около 90 МПа; площадь зоны контактного сцепления поверхностей имеет малые отличия; наблюдается более равномерное распределение контактного давления, что можно наблюдать в таблице 4.2.1; вблизи края антифрикционной прослойке не наблюдается раскрытия контакта.

Таблица 4.2.1

Контактное давление на S_{K_1}

№ материала	$\max P_K _{r \in S_{K_1}}$, МПа	$\min P_K _{r \in S_{K_1}}$, МПа
1	90,80	21,23
2	92,22	20,27
3	110,40	17,07
4	148,46	0,00
5	135,57	0,00
6	96,27	19,72

Можно отметить раскрытие контакта в опорных частях с антифрикционной прослойкой из материалов 4–5 вблизи ее края. Отлипание контактных поверхностей наблюдается на 4-5% контактной поверхности. Максимальный уровень контактного давления в прослойках из материалов 4–5 в среднем в 1,4 раза выше, чем в прослойках из других рассмотренных материалов.

Контактное касательное напряжение возрастает от центра опорной части до зоны смены контактных состояний с «полного сцепления» до «проскальзывания», с дальнейшим снижением уровня в зоне проскальзывания к краю прослойки. При самом неблагоприятном случае вблизи края прослойки наблюдается отлипание контактных поверхностей. Максимальный уровень контактного касательного напряжения ниже контактного давления для всех рассматриваемых материалов в 28 раз.

На рис. 4.2.2 рассмотрим параметры контакта на поверхности S_{K_2} .

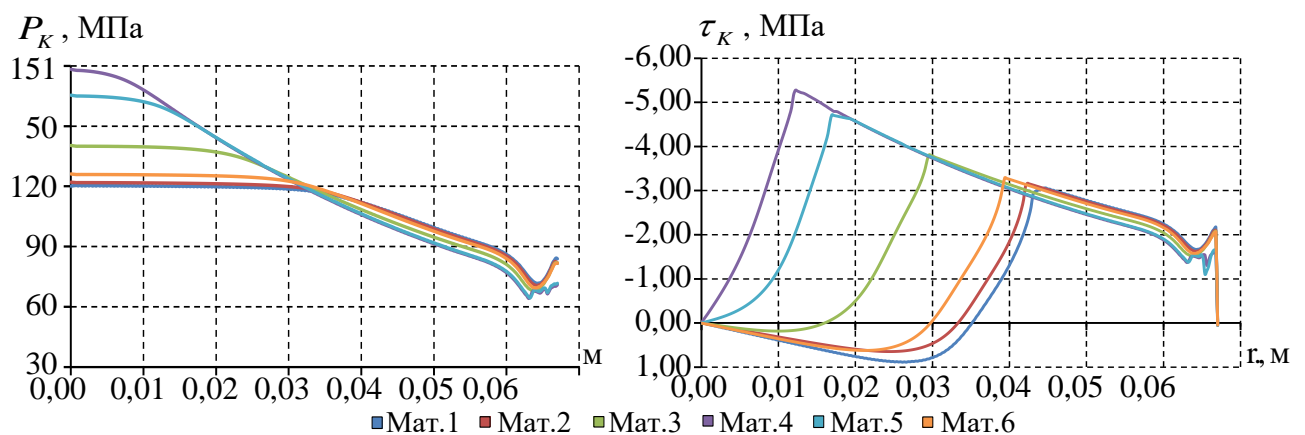


Рис. 4.2.2. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_2} при $h_p = 4$ мм

На поверхности S_{K_2} край прослойки ограничен нижней стальной плитой, что при проявлении пластических свойств материала приводит к возникновению скачков на параметрах контакта, данный эффект так же связан с изменением статусов контактных состояний. Аналогично S_{K_1} в прослойках из материалов 4–5 наблюдаются максимальные по уровню значения контактных характеристик и более неравномерное их распределение вблизи края антифрикционной

прослойки. В таблице 4.2.2 показано сравнение максимальных и минимальных значений контактного давления на S_{K_2} .

Таблица 4.2.2
Контактное давление на S_{K_2}

№ материала	$\max P_K _{r \in S_{K_2}}$, МПа	$\min P_K _{r \in S_{K_2}}$, МПа
1	90,56	41,67
2	92,10	40,58
3	110,39	37,91
4	148,32	34,24
5	135,44	34,39
6	96,19	39,45

Более равномерное распределение контактного давления на S_{K_2} наблюдается у прослоек из материалов 1, 2, 6, аналогично поверхности S_{K_1} . Минимальное контактное давление материалов 1, 2, 6 приблизительно в 2-2,5 раза меньше чем максимальный уровень контактного давления. Максимальный и минимальный уровень контактного давления прослоек из других материалов отличается более чем в 4 раза.

Далее переходим к рассмотрению влияния толщины полимерной антифрикционной прослойки на контактные характеристики. Параметры оценки контактного давления и контактного касательного напряжения были выполнены по следующим формулам:

$$\tilde{P}_{K_{\min}} = \frac{(P_{K_{\min}} - P_{K_{\min}}|_{h_p=4.мм})}{P_{K_{\min}}|_{h_p=4.мм}} * 100\% , \quad (4.1)$$

$$\tilde{P}_{K_{\max}} = \frac{(P_{K_{\max}} - P_{K_{\max}}|_{h_p=4.мм})}{P_{K_{\max}}|_{h_p=4.мм}} * 100\% , \quad (4.2)$$

$$\tilde{\tau}_{K_{\min}} = \frac{(\tau_{K_{\min}} - \tau_{K_{\min}}|_{h_p=4.мм})}{\tau_{K_{\min}}|_{h_p=4.мм}} * 100\% , \quad (4.3)$$

$$\tilde{\tau}_{K_{\max}} = \frac{(\tau_{K_{\max}} - \tau_{K_{\max}}|_{h_p=4.мм})}{\tau_{K_{\max}}|_{h_p=4.мм}} * 100\% , \quad (4.4)$$

где $P_{K_{\min}}, P_{K_{\max}}$ – минимальное и максимальное контактное давление, $\tau_{K_{\min}}, \tau_{K_{\max}}$ – минимальное и максимальное контактное касательное напряжение, при h_p равном 6 и 8 мм, \tilde{P}_K и $\tilde{\tau}_K$ – изменение контактного давления и контактного касательного напряжения в процентном соотношении, графики которых мы можем наблюдать на рис. 4.2.3 и 4.2.4.

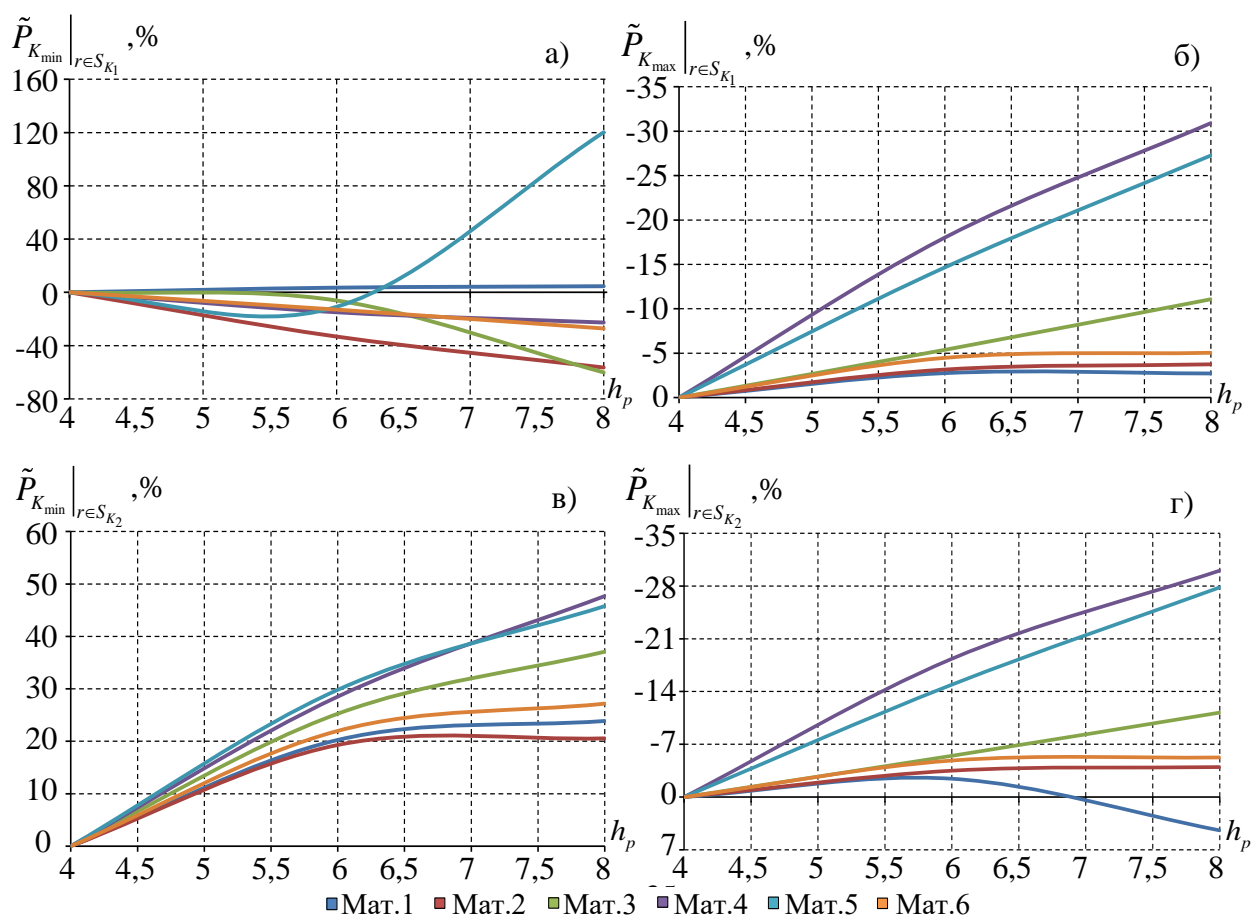


Рис. 4.2.3. Уровень изменения контактного давления в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_1} (а - б) и S_{K_2} (в - г).

На графиках видно, что мат. 5 ведет себя неоднозначно: при увеличении толщины полимерной прослойки почти все его значения контактных давлений растет, кроме минимального контактного давления на поверхности S_{K_1} (рис. 4.2.3 – а); при изменении прослойки с 4 мм на 6 мм, оно уменьшается; при изменении на 8 мм, оно резко увеличивается и поэтому нельзя точно определить, как поведет себя этот материал при дальнейшем изменении прослойки. У всех материалов мы наблюдаем уменьшение значений максимального контактного давления на обеих поверхностях, кроме мат. 1, у которого наблюдается небольшое уменьшение значений на поверхности S_{K_2} при толщине прослойки 6 мм, но далее на 8 мм происходит рост значений до 4,42% относительно стандартной толщины прослойки. Минимальное контактное давление на S_{K_2} для всех материалов увеличивается и если для мат. 3–5 уровень изменения растет на протяжении всего участка, то для мат. 1, 2, 6, он значительно увеличивается при изменении толщина с 4 мм до 6 мм, а при изменении с 6 мм до 8 мм изменения незначительны.

Изменение контактного касательного напряжения приведено на рис. 4.2.4.

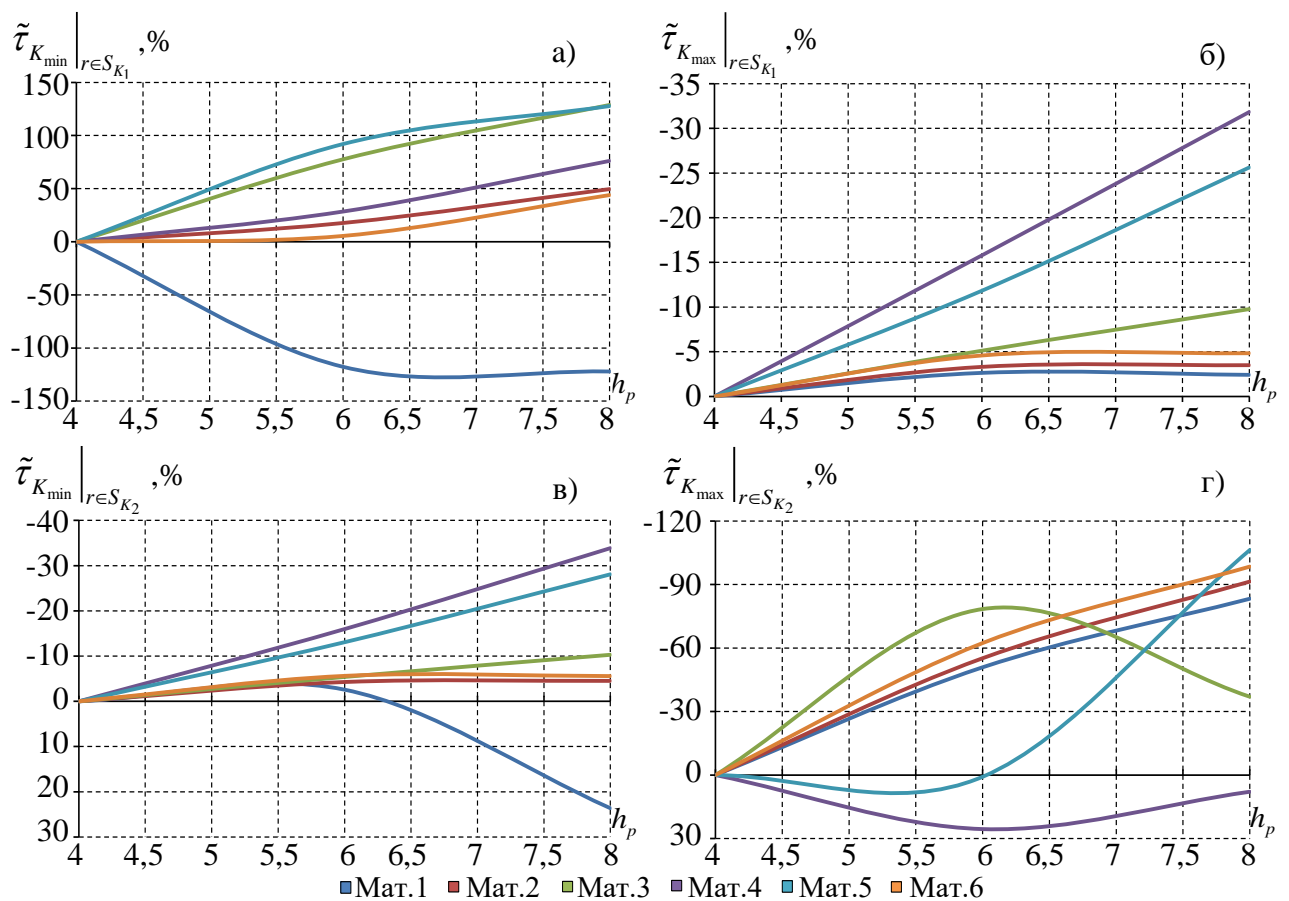


Рис. 4.2.4. Уровень изменения контактного касательного напряжения в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_1} (а - б) и S_{K_2} (в - г)

Мат. 2, 6 ведут себя идентично, что нельзя сказать об остальных материалах. Так рассматривая мат. 1, видим, что у него одного наблюдается значительное уменьшение минимального контактного касательного напряжения на S_{K_1} (около 125% в обоих случаях), максимальное контактное касательное напряжение на обеих поверхностях уменьшается. А минимальное контактное касательное напряжение на S_{K_2} в начале имеет незначительное уменьшение, примерно на 2,6%, а при увеличении толщины прослойки до 8 мм – увеличивается больше чем на 23,6%. Мат. 4, 5 имеют линейный характер изменения максимального и минимального контактного касательного напряжения на поверхностях S_{K_1} и S_{K_2} соответственно. Но изменение максимального контактного касательного напряжения не является таковым. На графике хорошо видно, что до 6 мм оно растет, а потом меняет свой характер изменения, начинает уменьшаться. И если мат. 4 плавно уменьшается, то мат. 5 имеет резкий скачок с 0,82% до -106,3%.

Для того чтобы в целом оценить картину влияния толщины прослойки на контактные характеристики, рассмотрим средние значения изменений, вычисленные по формулам, представленным ниже:

$$P_{K_l}^{cp} \Big|_{r \in S_{K_j}} = \sum_{i=1}^{n=6} P_{K_l}^i \Big|_{r \in S_{K_j}}, \quad j = \overline{1, 3} \quad (4.5)$$

$$\tau_{K_l}^{cp} \Big|_{r \in S_{K_j}} = \sum_{i=1}^{n=6} \tau_{K_l}^i \Big|_{r \in S_{K_j}}, \quad j = \overline{1, 3} \quad (4.6)$$

где $P_{K_l}^{cp}$ и $\tau_{K_l}^{cp}$ – среднее контактное давление и контактное касательное напряжение соответственно, n – количество материалов, l – толщина антифрикционного полимерного слоя сравниваемого с эталонным значением, $P_{K_l}^i \Big|_{r \in S_{K_j}}$ – контактное давление на слое S_{K_j} , $\tau_{K_l}^i \Big|_{r \in S_{K_j}}$ – контактное касательное напряжение на слое S_{K_j} , j – номер рассматриваемой области.

На рис. 4.2.5 продемонстрированы средние значения уровня изменений контактных характеристик от изменения толщины полимерной антифрикционной прослойки.

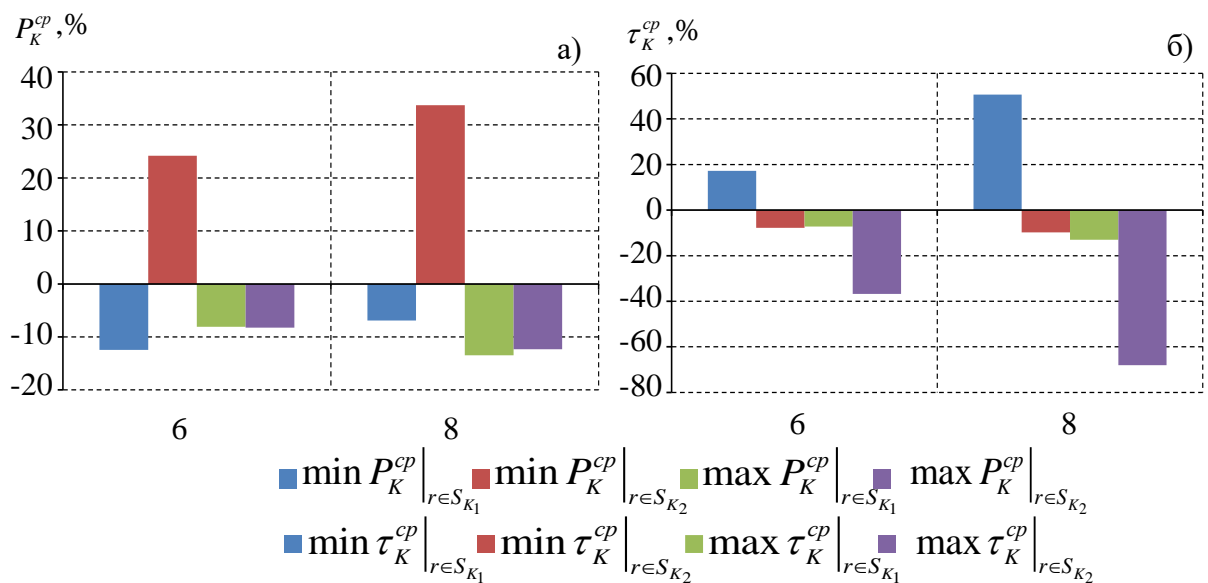


Рис. 4.2.5. Осредненные изменения контактного давления (а) и контактного касательного напряжения (б) на S_{K_1} и на S_{K_2}

Изменение толщины прослойки оказывает наибольшее влияние на минимальное контактное давление и контактное касательное напряжения на поверхностях S_{K_2} и S_{K_1} соответственно, а также на максимальное контактное касательное напряжение на S_{K_2} . Можем заметить, что оно существенно снижает свои значения больше чем на 50%.

Рассмотрев две основные поверхности контакта можно сделать первоначальные выводы. Мат. 2, 6 имеют наибольший радиус контактного сцепления и равномерное распределение контактного давления. Также изменение толщины антифрикционной прослойки не оказывает на них существенное влияние. Тогда как мат. 4, 5 имеют наименьший радиус контактного прилипания, и изменение толщины полимерной антифрикционной прослойки оказывает на них значительное влияние. Мат. 1, 3 ведут себя неоднозначно и требуют дальнейших рассмотрений.

4.3. Анализ параметров контакта на относительно свободном торце антифрикционной прослойки

Проведем анализ третьей контактной поверхности S_{K_3} . Данная поверхность является относительно свободной: приблизительно 2 мм контактной поверхности свободны и не контактируют с другими элементами сферической опорной части.

На рис. 4.3.1 представлены контактные характеристики рассматриваемой поверхности S_{K_3} .

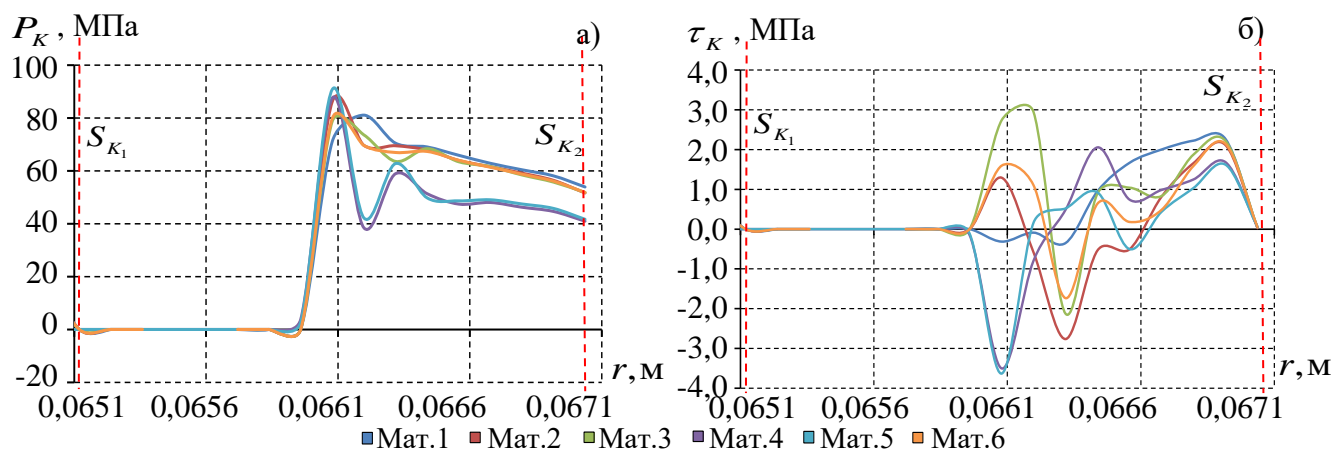


Рис. 4.3.1. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_3} при $h_p = 4$ мм

На свободной от контакта части поверхности, мы наблюдаем нулевые контактные характеристики, а их пики приходятся на зону концентрации напряжения вблизи буртика нижней плиты со сферическим вырезом. Мат. 4–5 обладают наибольшими уровнями контактного давления с резким снижением его значения на основной поверхности контакта, что связано с проявлением пластических свойств материалов. Мат. 2, 3, 6 имеют схожий характер поведения: максимум наблюдается в зоне контакта буртика нижней плиты сферической опорной части с дальнейшим относительно равномерным снижением уровня к поверхности контакта S_{K_2} . У мат. 1 наблюдается пологий пик. Контактное давление и контактное касательное напряжение на поверхности S_{K_3} в среднем ниже в 1,5 раза значений на поверхностях S_{K_1} , S_{K_2} .

Далее, на рис. 4.3.2, рассмотрим уровень изменения контактных характеристик в зависимости от изменения толщины антифрикционной полимерной прослойки.

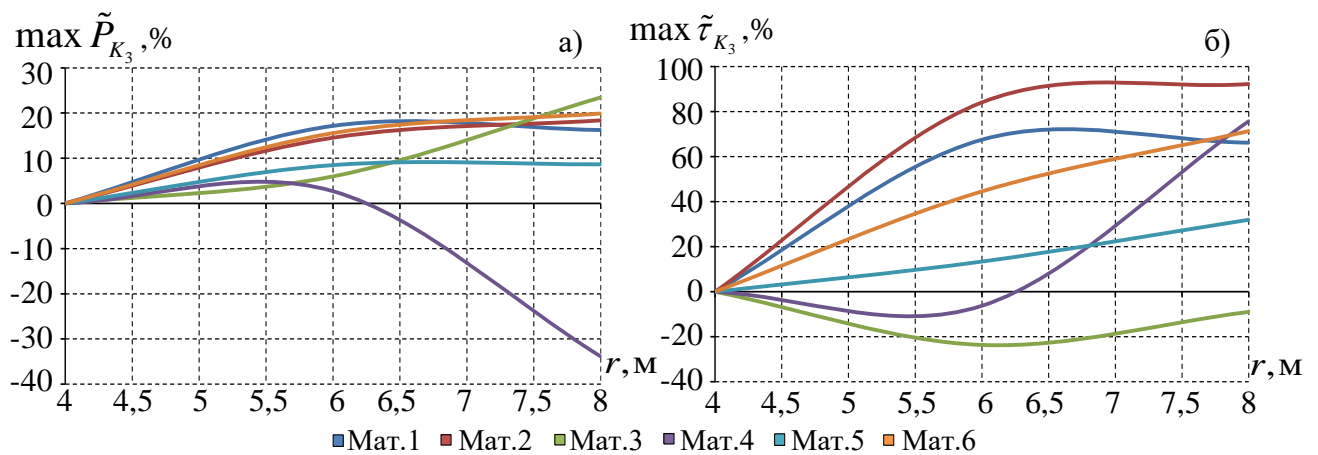


Рис. 4.3.2. Уровень изменения контактного давления (а) и контактного касательного напряжения (б) в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_3}

Максимальное контактное давление прослоек из мат. 1, 2, 6 увеличивается в среднем на 18 %, с дальнейшим выходом на асимптоту. Аналогичное поведение можно наблюдать и у прослойки из материала 5 с увеличением уровня максимального контактного давления на 10 %. Характер влияния толщины прослойки на параметры контакта у прослоек из мат. 3-4 отличается от остальных рассмотренных материалов. У мат. 4 мы наблюдаем снижение максимального значения контактного давления, вплоть до 33,87 %, тогда как контактное касательное напряжение у материала 3 поначалу убывает (для толщины 6 мм равно -23,63 %), а потом возрастает до -8,97 % для толщины 8 мм.

На рис. 4.3.3 рассмотрим общую характеристику влияния толщины антифрикционной прослойки на максимальные контактные давление и касательное напряжение на S_{K_3} .

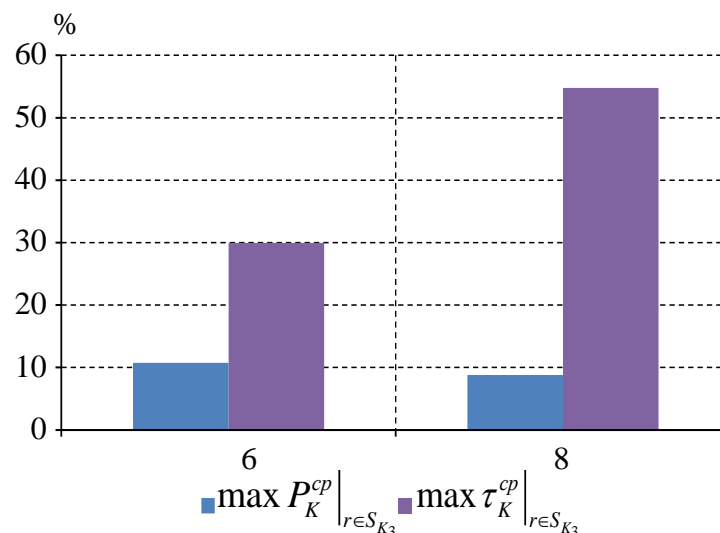


Рис. 4.3.3. Осредненные изменения контактного давления и контактного касательного напряжения на S_{K_3}

Толщина антифрикционной прослойки имеет сильное влияние на значения максимального контактного касательного напряжения, оно

постепенно увеличивается. Максимальное контактное давление обладает незначительным увеличением значений.

Особый интерес представляют нормальные перемещения края прослойки. На рис. 4.3.4 показано перемещение и диаграмма максимальных значений перемещений материалов при стандартной толщине прослойки $h_p = 4$.

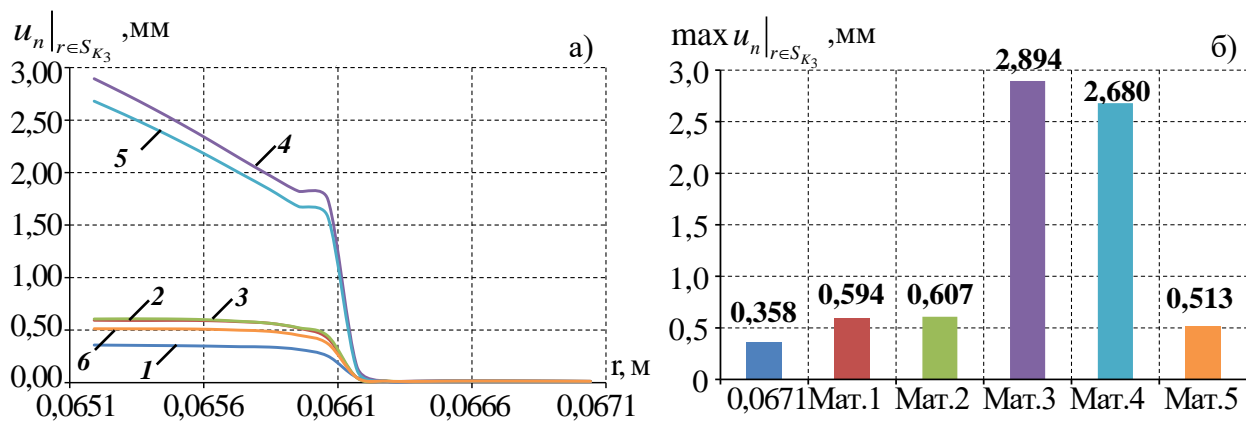


Рис. 4.3.4. Распределение нормальных перемещений (а) и максимальные значения перемещений (б) на S_{K_3} при толщине $h_p = 4$ мм

Наибольшему деформированию подверглись прослойки из мат. 4-5 при одинаковом уровне нагрузки, максимальные перемещения края прослойки практически в 4 раза больше, чем у прослоек из других материалов. Минимальные перемещения имеет мат. 1, а прослойки из мат. 2, 3, 6 имеют значения примерно на одном уровне (около 0,5-0,6 мм).

Рассмотрим уровень изменения максимальных перемещений от толщины антифрикционной прослойки относительно стандартной толщины $h_p = 4$ мм в процентном соотношении, который в свою очередь был рассчитан по формуле:

$$\Delta u_{n_{\max}} = \frac{(u_{n_{\max}} - u_{n_{\max}}|_{h_p=4, \text{ мм}})}{u_{n_{\max}}|_{h_p=4, \text{ мм}}} * 100\%, \quad (4.7)$$

На рис. 4.3.5 представлены вычисленные значения уровня изменений максимальных перемещений.

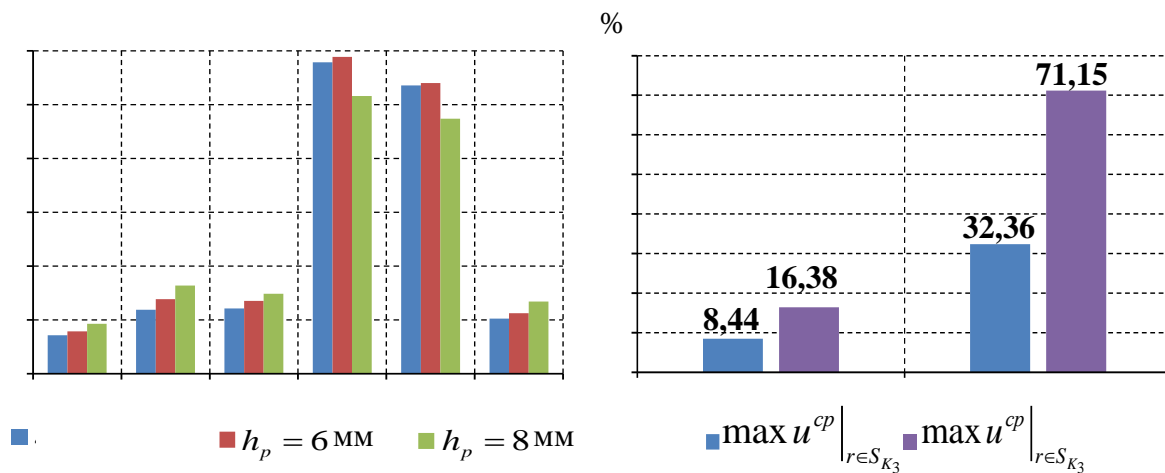


Рис. 4.3.5. Максимальные перемещения на каждой толщине (а) и среднее изменение максимальных перемещений относительно толщины $h_p = 4$ мм

Значения максимальных перемещений у мат. 1, 2, 3, 6 постепенно увеличиваются и не превышают 1 мм. Максимальные перемещения антифрикционных прослоек из мат. 4-5 значительно больше, чем у прослоек из других рассматриваемых материалов (более чем в 3 раза). У прослоек из мат. 4-5 наблюдается незначительное снижение значений максимальных перемещений при толщине прослойки 8 мм.

На рис. 4.3.6 представлены диаграммы изменения уровня максимальных и минимальных значений перемещений относительно стандартной толщины антифрикционной прослойки.

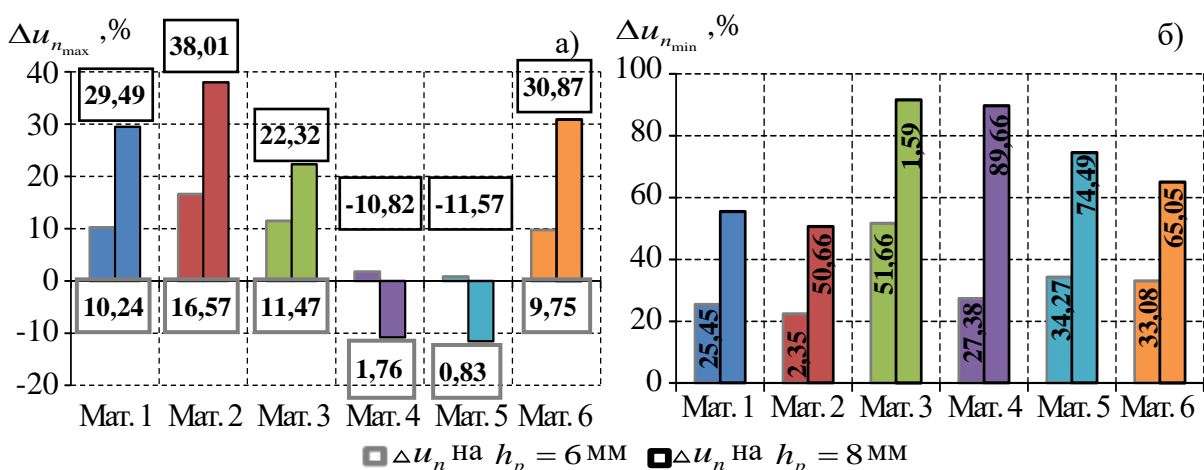


Рис. 4.3.6. Изменение максимальных (а) и минимальных (б) перемещений относительно перемещений на толщине $h_p = 4$ мм

Для материалов 1, 2, 3, 6 уровень изменения минимальных перемещений в среднем в 2 – 3 раза выше, чем уровень изменения максимальных перемещений. Что же касается материалов 4 – 5, то у них наблюдаются незначительные изменения максимальных перемещений, однако, минимальные перемещения при изменении толщины полимерной прослойки значительно увеличиваются.

Так как при воздействии давления на сферическую опору происходит деформирование материала, то при больших перемещениях может произойти срез полимерной антифрикционной прослойки, что может оказать влияние на ее рабочие характеристики. Материалы 4-5 обладают наиболее неблагоприятным деформационным поведением, что связано со значительным деформированием геометрической конфигурации относительно свободной поверхности контакта и проявлением большого уровня пластических деформаций вблизи края прослойки.

4.4. Анализ осадки верхней плиты со сферическим сегментом и интенсивности напряжений и пластических деформаций

Анализ работы осесимметричной модели сферической опорной части можно сделать при сравнении результатов численного моделирования с результатами натуральных экспериментов. В рамках исследовательской работы [68] были выполнены серии натуральных экспериментов о деформировании

вертикальной нагрузкой 500-1250 кН реальной конструкции сферической опорной части Л-100 производства ООО «Альфа-Тех» с антифрикционной прослойкой из материала 6. На рис. 4.4.1 представлена диаграмма значений осадки верхней плиты полученных с помощью численного моделирования и значения полученного с помощью натуральных экспериментов при номинальной нагрузке 1000 кН.

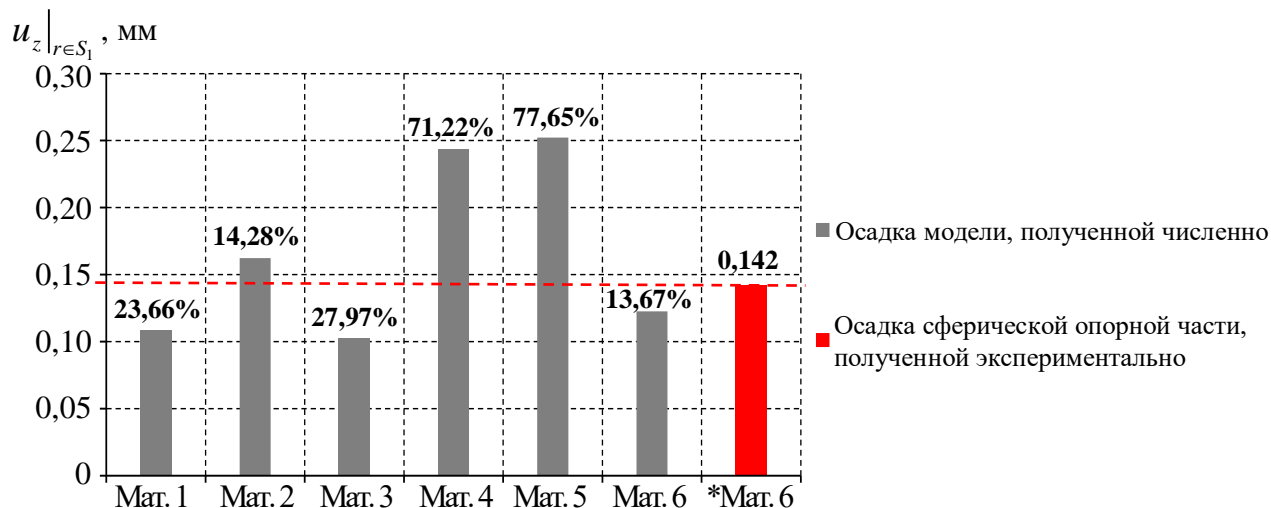


Рис. 4.4.1. Значения осадки верхней плиты для стандартной толщины прослойки

Рассмотрев диаграмму значений осадки верхней плиты можно отметить, что минимальное значение принадлежит прослойке из материалов 1 и 3 приблизительно $0,102 \div 0,108$ мм. Наибольшая осадка наблюдается у сферических опорных частей с прослойками из материалов 4-5 $\sim 0,25$ мм. Установлено, что разница результатов значений осадки полученных численно и экспериментально для модели с одинаковой антифрикционной прослойкой из материала 6 составляет $\sim 13,7\%$, при этом в сферической опорной части не учтен плоский слой скольжения, нанесенного на S_2 , а так же канавок со смазочным материалом. Таким образом, модель сферической опорной части без учета канавок со смазкой в осесимметричной постановке дает достаточно хорошее количественное и качественное соответствие результатам натуральных экспериментов.

Для общей картины представления поведения материала от изменения толщины антифрикционной прослойки на рис. 4.4.2 рассмотрим значения и уровень изменения осадки.

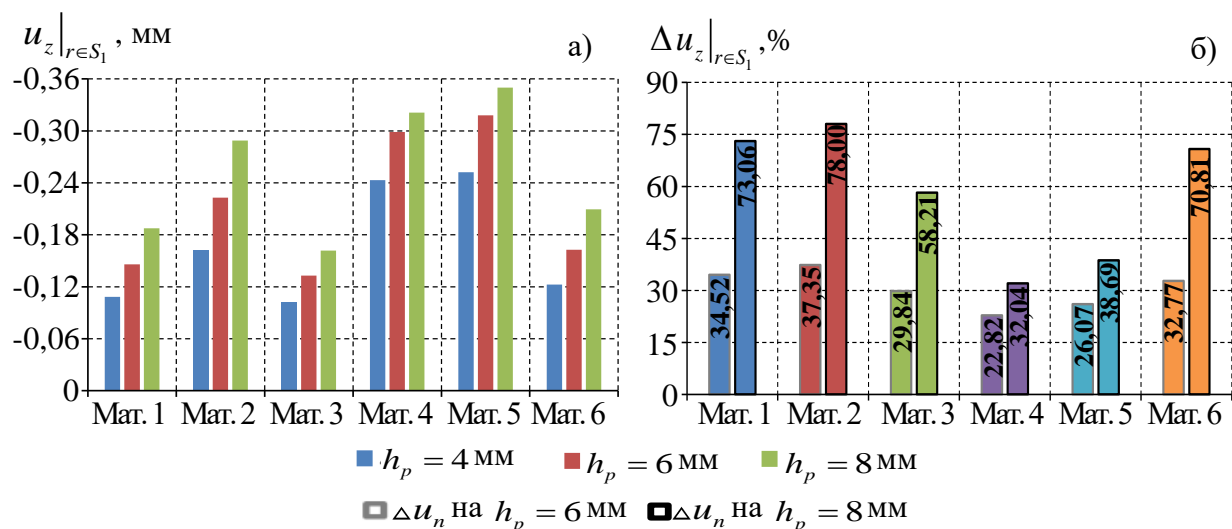


Рис. 4.4.2. Значения осадки верхней плиты при различной толщине полимерной прослойки (а), уровень изменения осадки в зависимости от изменения толщины прослойки относительно $h_p = 4$ мм в процентном соотношении (б)

Наибольшая осадка наблюдается у опорных частей с прослойками из материалов 4–5, но при этом они обладают наименьшим уровнем изменения осадки при варьировании толщины полимерной прослойки. На сферические опорные части с прослойками из материалов 1, 2, 6 изменение толщины оказывает наибольшее влияние в среднем для 6 мм идёт увеличение значений на 34,88 %, а для 8 мм на 73,95 %. В целом, материал 3 показал себя наилучшим образом. Он имеет минимальные значения и средний уровень изменения осадки для 6 мм заметно увеличение значений осадки на 29,84 % и для 8 мм на 58,21%.

На рис. 4.4.3. – 4.4.4. продемонстрированы интенсивность напряжения и интенсивность пластических деформаций соответственно прослойки стандартной толщины $h_p = 4$ мм, выполненной из материала 6.

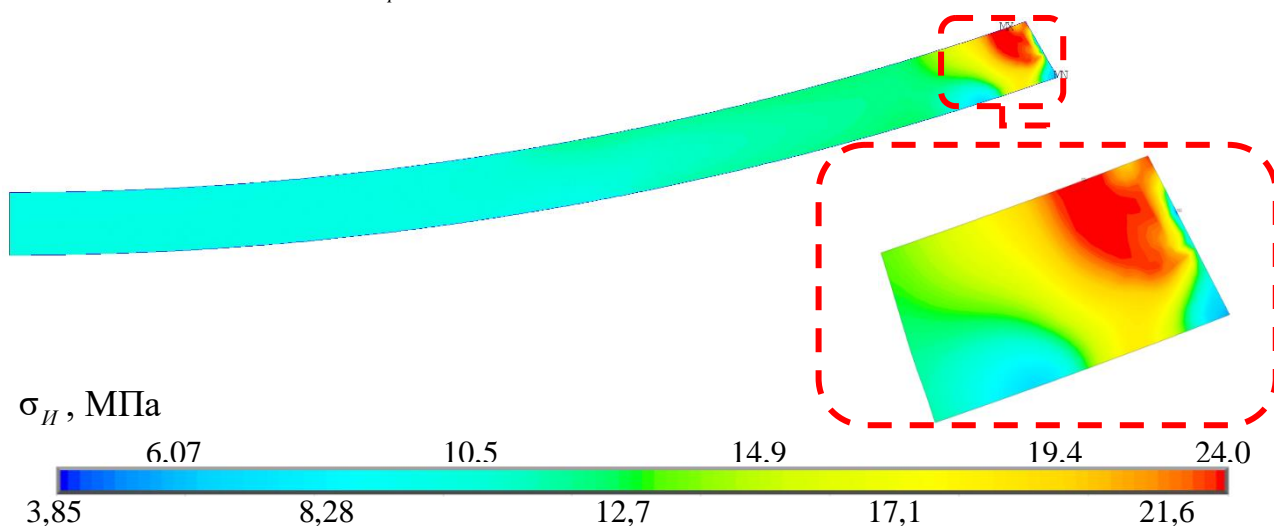


Рис. 4.4.3. Интенсивность напряжений $h_p = 4$ мм для мат. 6

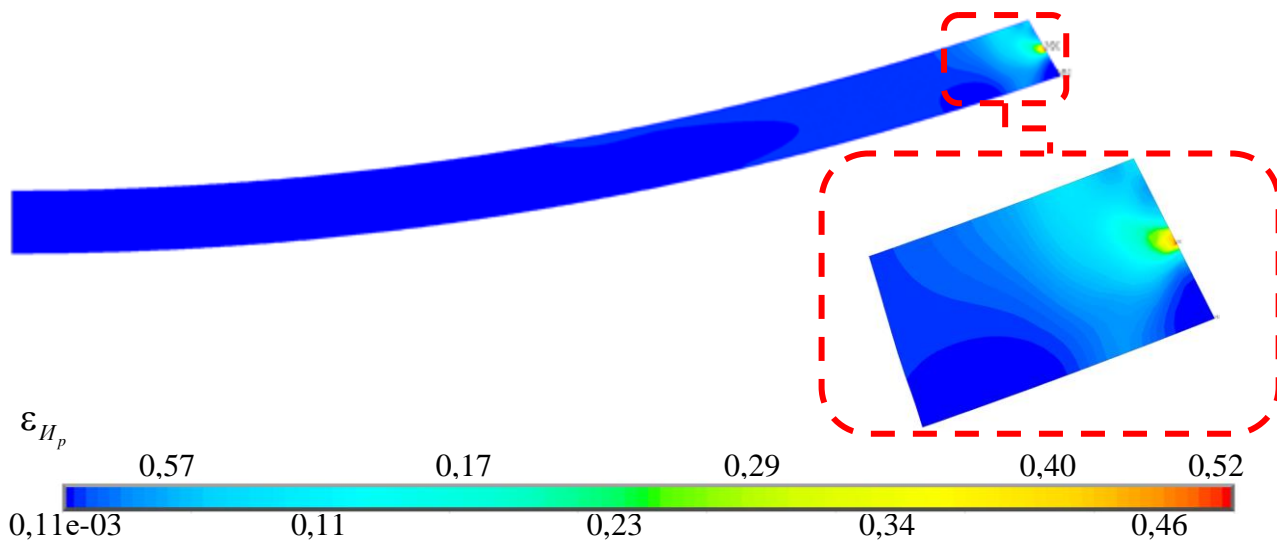


Рис. 4.4.4. Интенсивность пластических деформаций $h_p = 4$ мм для мат. 6

Максимальный уровень интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций наблюдается около относительно свободного края прослойки. На основной же части антифрикционной полимерной прослойки наблюдается минимальные распределенные напряжения и пластические деформации. Большая часть антифрикционной прослойки работает в рамках теории упругости.

В таблице 4.4.1 представлены максимальные значения интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций.

Таблица 4.4.1

Максимальные значения интенсивности напряжений/пластических деформаций

№ материала	σ_{II} , МПа	ε_{Ip}
1	27,4	0,40
2	24,2	0,59
3	23,1	0,59
4	15,3	2,54
5	16,2	2,48
6	24,0	0,52

У прослоек из материалов 4-5 наблюдаются наименьшие значения интенсивности напряжений, при этом они имеют наибольший уровень пластических деформаций, который в 4,8 раз превышает уровень пластических деформаций у остальных материалов. Максимальные значения интенсивности напряжений и пластических деформаций находятся примерно на одном уровне и в среднем равны $\sim 24,7$ МПа; $\sim 0,53$ соответственно для прослоек из материалов 1, 2, 3, 6. При изменении толщины полимерной антифрикционной прослойки изменения максимальных значений интенсивности напряжений не наблюдается.

А на рис. 4.4.5 рассмотрим, как параметр толщины полимерной антифрикционной прослойки влияет на интенсивность пластических деформаций.

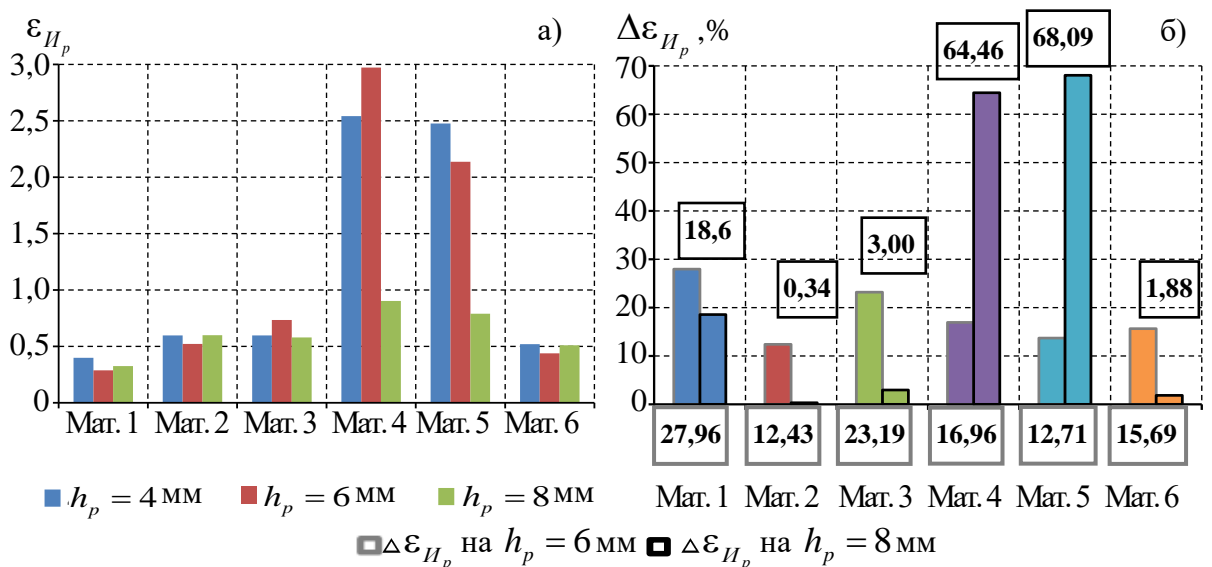


Рис. 4.4.5. Диаграмма максимальных значений интенсивности пластических деформаций (а) и влияние толщины полимерной прослойки на них (б)

Можем заметить, что толщина полимерной прослойки существенно влияет на максимальные значения интенсивности пластических деформаций на прослойках из материалов 4–5. При увеличении толщины до 8 мм уровень пластических деформаций падает в среднем $\sim 66,3 \%$. В прослойках из материалов 2, 3, 6 увеличение толщины до 6 мм оказывает больше влияния (19,8 %), чем изменение толщины до 8 мм (1,7 %). Материал 1 показывает минимальные значения интенсивности пластических деформаций для всех толщин и в среднем его значения увеличиваются на 23 %.

4.5. Выводы по главе

Выполнен численный анализ деформационного поведения элементов сферической опорной части в рамках реализации фрикционного контактного взаимодействия верхней плиты со сферическим сегментом и нижней плиты со сферическим вырезом опорной части через упругопластическую полимерную прослойку:

- Провели анализ контактных параметров для стандартной толщины полимерной антифрикционной прослойки и деформирование относительно свободного края антифрикционной прослойки. Для большинства прослоек из рассматриваемых материалов расхождения контактных поверхностей не наблюдается, снижение площади контактной поверхности, связанное с расхождением контактных поверхностей, наблюдается у прослоек из материалов 4 – 5 и составляет 4-5 % от первоначальной площади контакта. На поверхности относительно свободного края прослойки наименьшие значения контактного давления наблюдаются в прослойках из материалов 3, 6.

- Провели сравнение контактных характеристик при изменении толщины полимерной антифрикционной прослойки и выявили, что наибольшее влияние толщина полимерной прослойки оказывает на композиционные материалы.

- Выполнили анализ осадки сферической опорной части, рассмотрели интенсивность напряжений и пластических деформаций.

Наименьшая осадка сферической опорной части наблюдаются у опорных частей с антифрикционными прослойками из материалов 1 – 3, 6, осадка опор с антифрикционными прослойками из композиционных материалов приблизительно в 1,5-2 раза больше.

5. Анализ влияния фрикционных свойств материалов на контакт элементов сферических опорных частей

Рассмотрим влияние значения коэффициента трения на контактные характеристики полимерной прослойки. В предыдущих работах рассматривалось влияние толщины полимерной прослойки выполненной из разных материалов, и значение коэффициента трения принималось табличное $\mu_1=0.04$, сейчас же рассмотрим так же экспериментальные значения коэффициента трения без учета (μ_2) и с учетом (μ_3) смазки для трех материалах, при разной толщине антифрикционной прослойки. Значения коэффициентов трения представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Значения коэффициентов трения			
№ материала	μ_1	μ_2	μ_3
1	0,04	0,03218	0,0047
2		0,03798	0,02676
3		0,0207	0,00718

5.1. Анализ параметров контактного взаимодействия для полимерной прослойки стандартной толщины на основных поверхностях контакта

На начальном этапе были рассмотрены прослойки стандартной толщины по данным ООО «АльфаТех» – 4 мм. Рассмотрим две основные контактные поверхности – S_{K_1} и S_{K_2} . На поверхности S_{K_1} происходит поворот сферического сегмента верхней плиты. На рис. 5.1.1 представлено контактное давление и контактное касательное напряжение для трех материалов с разными значениями коэффициента трения.

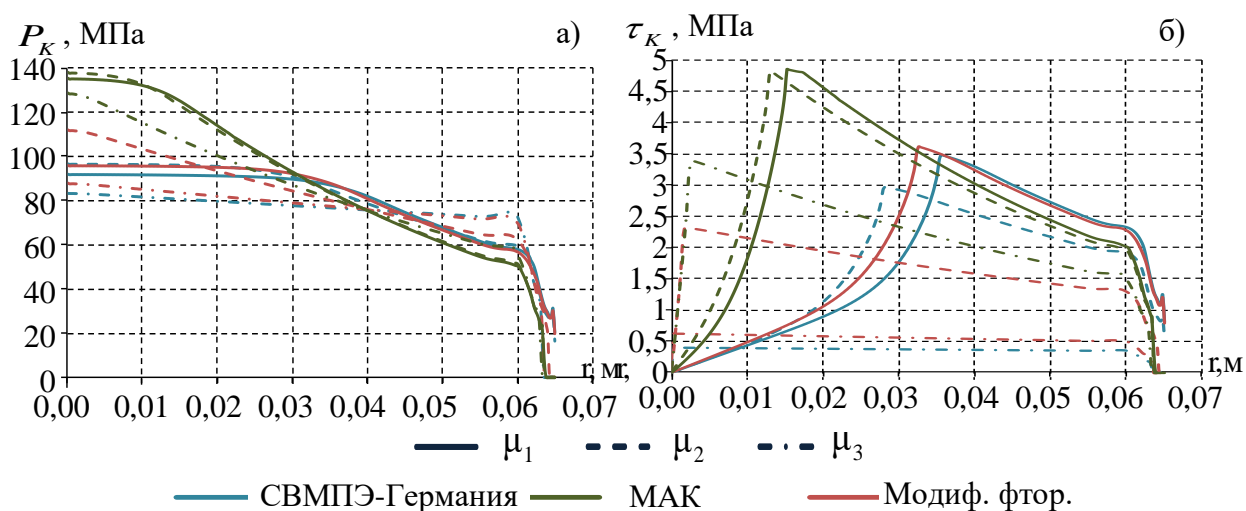


Рис. 5.1.1. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_1} при $h_p = 4$ мм

Хорошо видно, что фрикционные свойства материала существенно влияют на характер поведения параметров контакта. Наибольшее контактное давление для всех значений коэффициента трения наблюдается у композитного материала (табл. 5.1.1), наблюдается снижение площади контактной поверхности, связанное с их расхождением, для μ_1 , μ_2 – на 2,18 %, μ_3 – 2,91 %

от первоначальной площади контакта. Для μ_1 и μ_2 изменений практически не наблюдается, а для μ_3 мы наблюдаем не только снижение максимального контактного давления на 5,81 %, но и более равномерное распределение контактного давления. Как можем заметить из рис. 5.1.1 (б), данному материалу соответствует наибольшее значение контактного касательного напряжения, чем для других материалов. При изменении коэффициента трения наибольшее значение контактного касательного напряжения уменьшается для μ_2 эти изменения незначительны $\sim 0,4$ %, зато для μ_3 уменьшения происходит на ~ 30 %. Кроме этого уменьшается зона «прилипания» и увеличивается зона «проскальзывания» прослойки.

Рассматривая материалы СВМПЭ производства Германии и модифицированный фторопласт можно заметить характер поведения контактного давления для коэффициентов трения μ_1 и μ_3 имеет малые различия, что нельзя сказать о контактном давлении при коэффициенте трения μ_2 . При μ_3 хорошо видно, что на обоих материалах контактное давление равномерно распределяется по площади контакта. У обоих материалов при μ_3 наблюдается уменьшение площади контактной поверхности на 2,55 % от первоначальной площади контакта. Однако для модифицированного фторопласта расхождение контактных поверхностей также при μ_2 и площадь контакта уменьшается на 1,46 %.

Таблица 5.1.1

Значения коэффициентов трения

№ материала	P_K , МПа			τ_K , МПа		
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_1	μ_2	μ_3
1	92,22	96,54	83,29	3,47	2,96	0,39
2	135,57	137,77	128,72	4,85	4,83	3,38
3	96,27	112,3	87,65	3,62	2,31	0,63

Что касается контактного касательного напряжения, то наименьшие значения наблюдаются у СВМПЭ и модифицированного фторопласта при μ_3 , но по всей площади контакта наблюдается зона «проскальзывания».

Далее на рис. 5.1.2 рассмотрим контактные параметры для поверхности S_{K_2} .

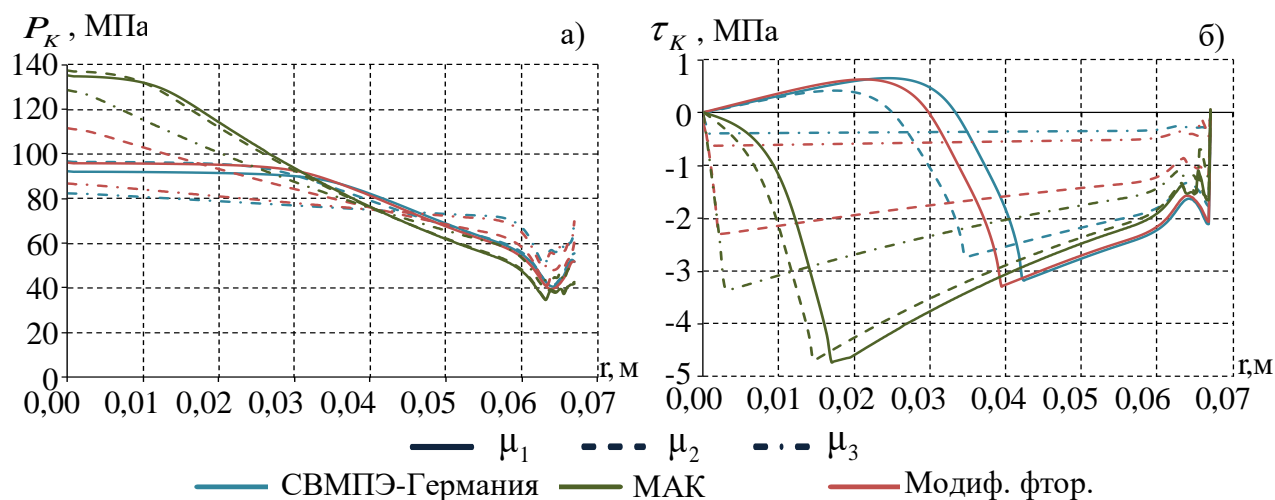


Рис. 5.1.2. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_2} при $h_p = 4$ мм

Наибольшее значение контактных параметров здесь, как и в случае S_{K_1} , наблюдается у композитного материала. Значения для μ_1 и μ_2 достаточно близки. Для μ_3 наблюдается уменьшение контактных параметров: максимальное контактное давление меньше на 6,02 % (табл. 5.1.2), максимальное контактное касательное напряжение меньше на 44,35 %. Для всех материалов контактное давление ведет себя также как на поверхности S_{K_1} . Наименьшее контактное касательное напряжение наблюдается у СВМПЭ и модифицированного фторопласта с коэффициентом трения μ_3 .

Таблица 5.1.2

Значения коэффициентов трения

№ материала	P_K , МПа			τ_K , МПа		
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_1	μ_2	μ_3
1	92,09	96,41	82,6	-3,17	-2,75	-0,39
2	135,44	137,63	128,31	-4,72	-4,69	-3,36
3	96,19	111,74	86,85	-3,29	-2,29	-0,62

5.2. Анализ изменения параметров контактного взаимодействия при увеличении толщины антифрикционной прослойки из разных материалов

Для анализа изменения контактных параметров при варьировании фрикционных свойств и толщины полимерной антифрикционной прослойки рассмотрим каждый материал по отдельности.

5.2.1. СВМПЭ производства Германии

Для удобства будем сравнивать изменения максимального контактного давления и контактного касательного напряжения. Для этого вычислялся уровень изменения контактных параметров в зависимости от фрикционных свойств полимерной прослойки по формуле 10.

$$\tilde{P}_{K_{\max}} = \frac{\left(P_{K_{\max}} - P_{K_{\max}} \Big|_{\mu=\mu_1} \right)}{P_{K_{\max}} \Big|_{\mu=\mu_1}} * 100\%, \quad (5.1)$$

$$\tilde{\tau}_{K_{\max}} = \frac{(\tau_{K_{\max}} - \tau_{K_{\max}}|_{\mu=\mu_1})}{\tau_{K_{\max}}|_{\mu=\mu_1}} * 100\%, \quad (5.2)$$

где $P_{K_{\max}}$ – максимальное контактное давление, $\tau_{K_{\max}}$ – максимальное контактное касательное напряжение, при h_p равном 6 и 8 мм, \tilde{P}_K и $\tilde{\tau}_K$ – изменение контактного давления и контактного касательного напряжения в процентном соотношении, графики которых мы можем наблюдать на рисунках 5.2.1. – 5.2.3.

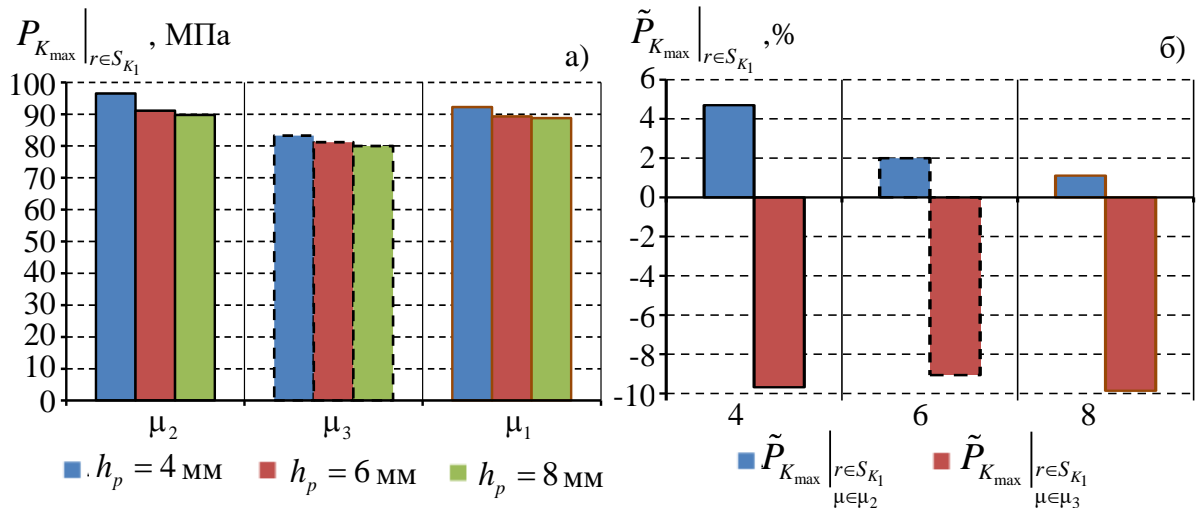


Рис. 5.2.1. Максимальные значения контактного давления при разной толщине прослойки (а) уровень изменения контактного давления в зависимости от фрикционных свойств полимерной прослойки (б) на S_{K_1}

На диаграммах хорошо видно, что при увеличении толщины полимерной прослойки происходит уменьшение максимальных значений контактного давления для каждого коэффициента трения. На рис. 5.2.1. (б) представлен уровень влияния экспериментальных фрикционных свойств на значения контактного давления относительно табличного значения коэффициента трения. Хорошо видно, что для всех толщин уровень контактного давления при μ_3 в среднем меньше на 9,43 %. Что касается μ_2 , здесь можно заметить, что чем больше прослойка, тем значения становятся ближе к μ_1 и в среднем контактное давление больше на 2,6 %.

Далее рассмотрим изменение контактного давления на поверхности S_{K_2} .

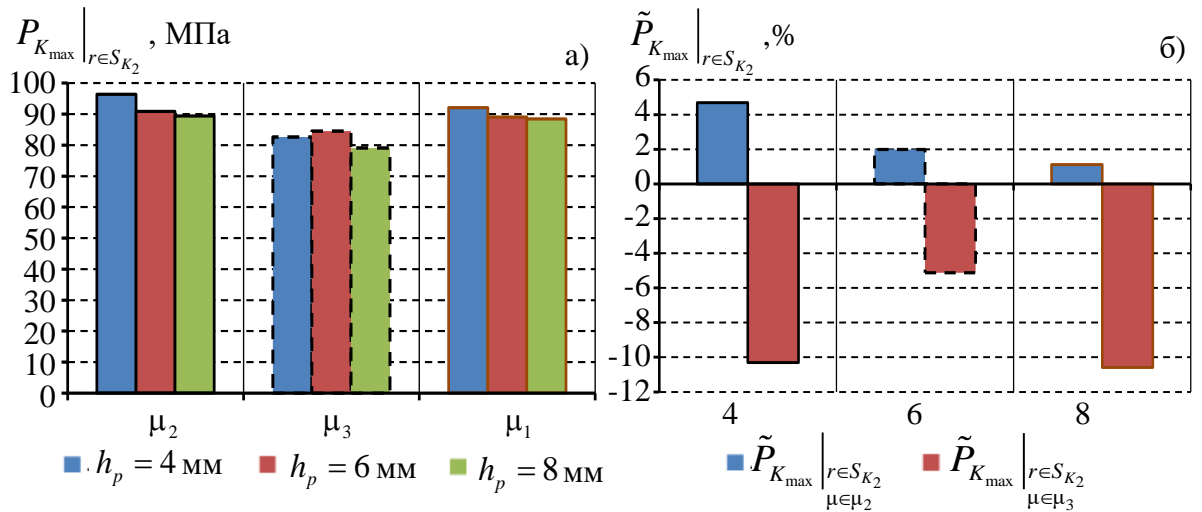


Рис. 5.2.2. Максимальные значения контактного давления для каждой толщины (а) уровень изменения контактного давления в зависимости от фрикционных свойств полимерной прослойки (б) на S_{K_2}

На это поверхности мы так же наблюдаем снижение значений максимального контактного давления при увеличении толщины прослойки. При μ_2 значения больше в среднем на 2,6 %, при μ_3 меньше в среднем на 8,68 % от значений, полученных при μ_1 .

Теперь рассмотрим уровень изменения контактного касательного напряжения на обеих контактных поверхностях.

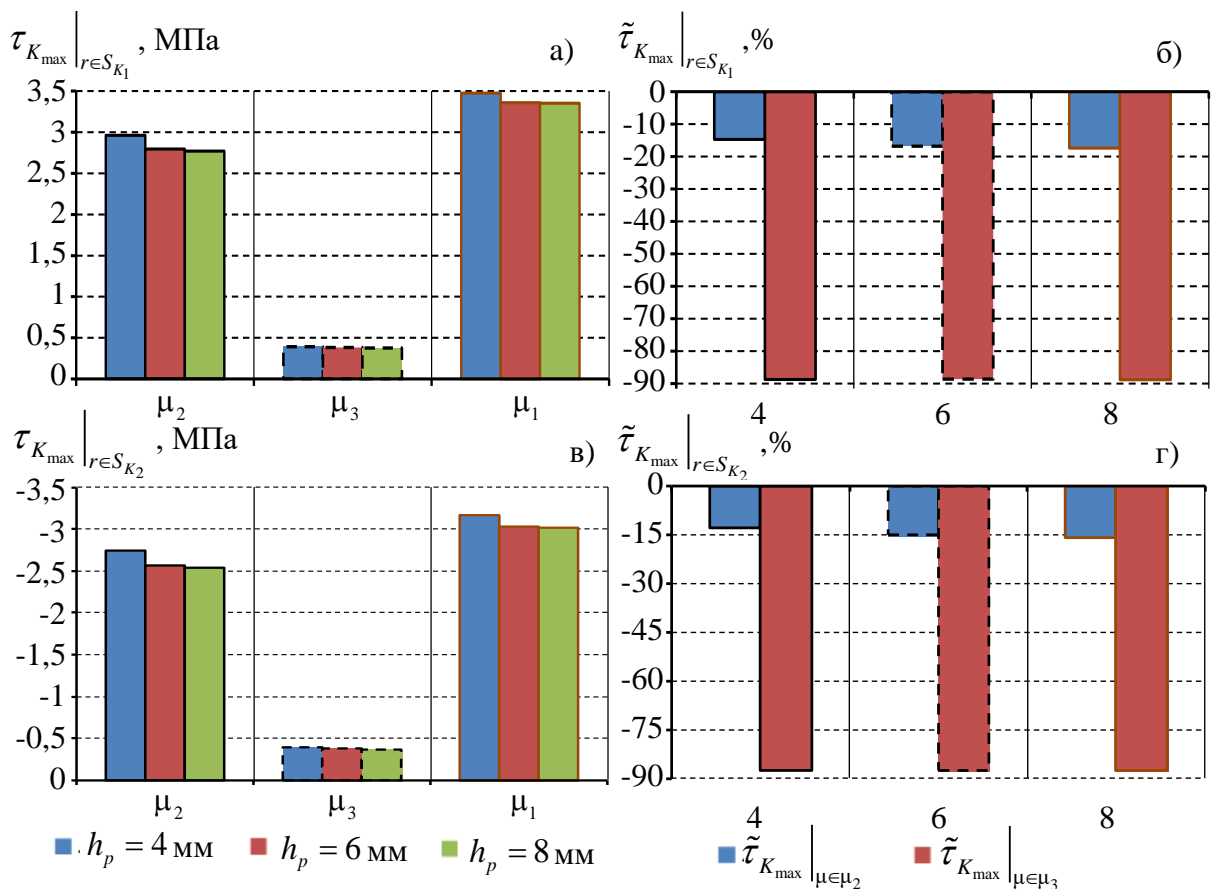


Рис. 5.2.3. Уровень изменения контактного касательного напряжения в зависимости от толщины прослойки на S_{K_1} (а – б) и S_{K_2} (в – г)

Рассматривая диаграммы изменения максимальных значений контактного касательного напряжения нельзя не отметить, что при μ_3 наблюдаются наименьшие значения, которые не превышают 0,4 МПа на обеих контактных поверхностях и значительно ниже (~ 88 % на обеих поверхностях) чем значения при μ_1 . При коэффициенте трения без смазки мы наблюдаем снижение уровня контактного касательного напряжения в среднем на 15 – 16 %, на S_{K_1} и S_{K_2} .

5.2.2. Антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена

Далее рассмотрим композитный материал со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена. Здесь и далее уровень изменения контактного давления и контактного касательного напряжения рассчитывались по формулам 5.1–5.2. На рис. 5.2.4 можно наблюдать максимальные значения контактного давления и их уровень изменения относительно μ_1 для обеих контактных поверхностей.

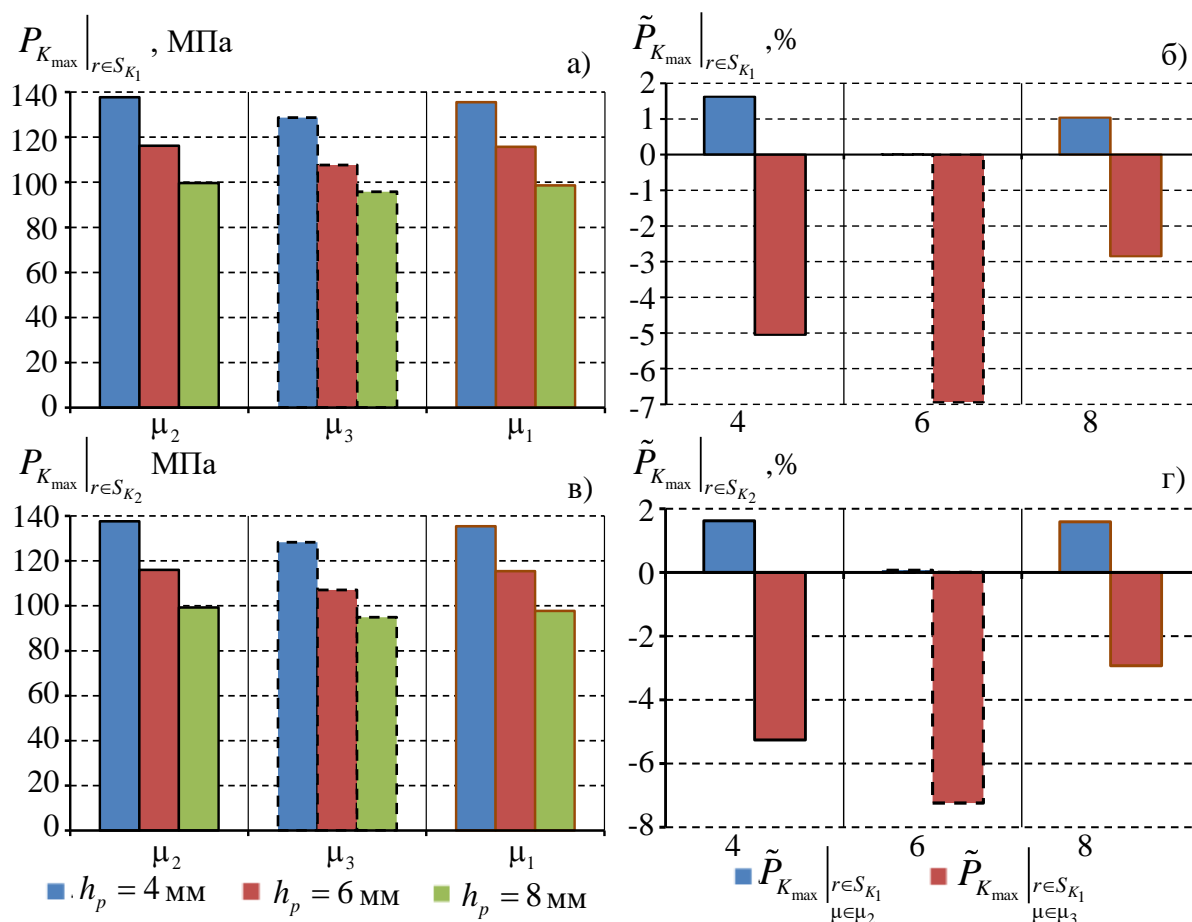


Рис. 5.2.4. Максимальные значения контактного давления для каждой толщины (а-в) уровень изменения контактного давления в зависимости от фрикционных свойств полимерной прослойки (б-г) на S_{K_1} (а – б) и S_{K_2} (в – г)

На данном материале можем заметить, что при μ_2 значения достаточно близки к значениям при μ_1 (в среднем на ~0,89 % больше). Но зато в случае фрикционных свойств материала со смазкой, мы наблюдаем уменьшение максимального уровня контактного давления в среднем на ~5 %.

На рис. 5.2.5. рассмотрим контактное касательное напряжение, и какое влияние оказывают на него фрикционные свойства материала.

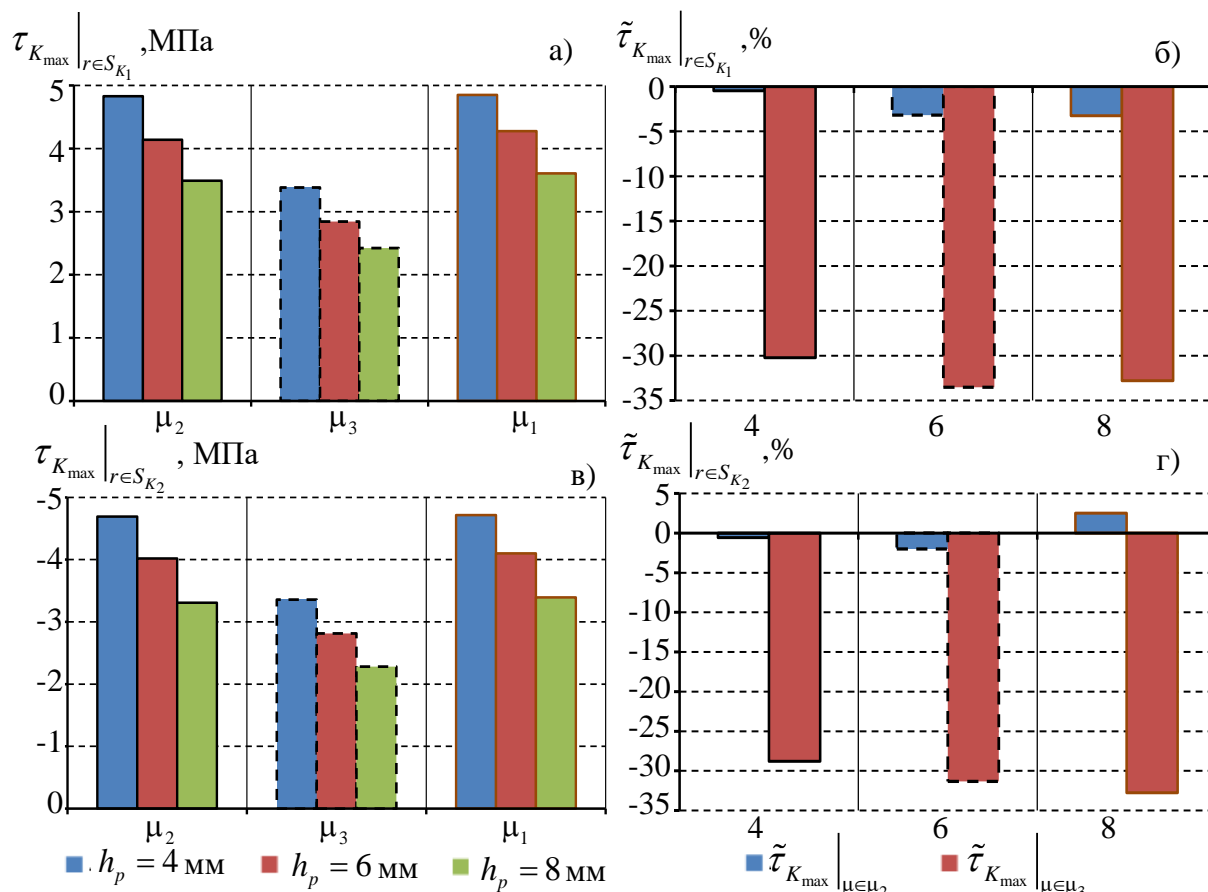


Рис. 5.2.5. Уровень изменения контактного касательного напряжения в зависимости от толщины прослойки на S_{K_1} (а – б) и S_{K_2} (в – г)

Можем заметить, что на обеих контактных поверхностях мы можем наблюдать близкие друг к другу значения контактного параметра. Наименьшее контактное касательное напряжение возникает при фрикционных свойствах полученных экспериментально со смазкой, и в среднем его уровень меньше на $\sim 32,2$ % и ~ 31 % относительно коэффициента трения на S_{K_1} и S_{K_2} соответственно.

5.2.3. Модифицированный фторопласт

На рис. 5.2.6. представлены максимальные значения контактного давления на поверхностях S_{K_1} и S_{K_2} для трех толщин и при различных фрикционных свойствах.

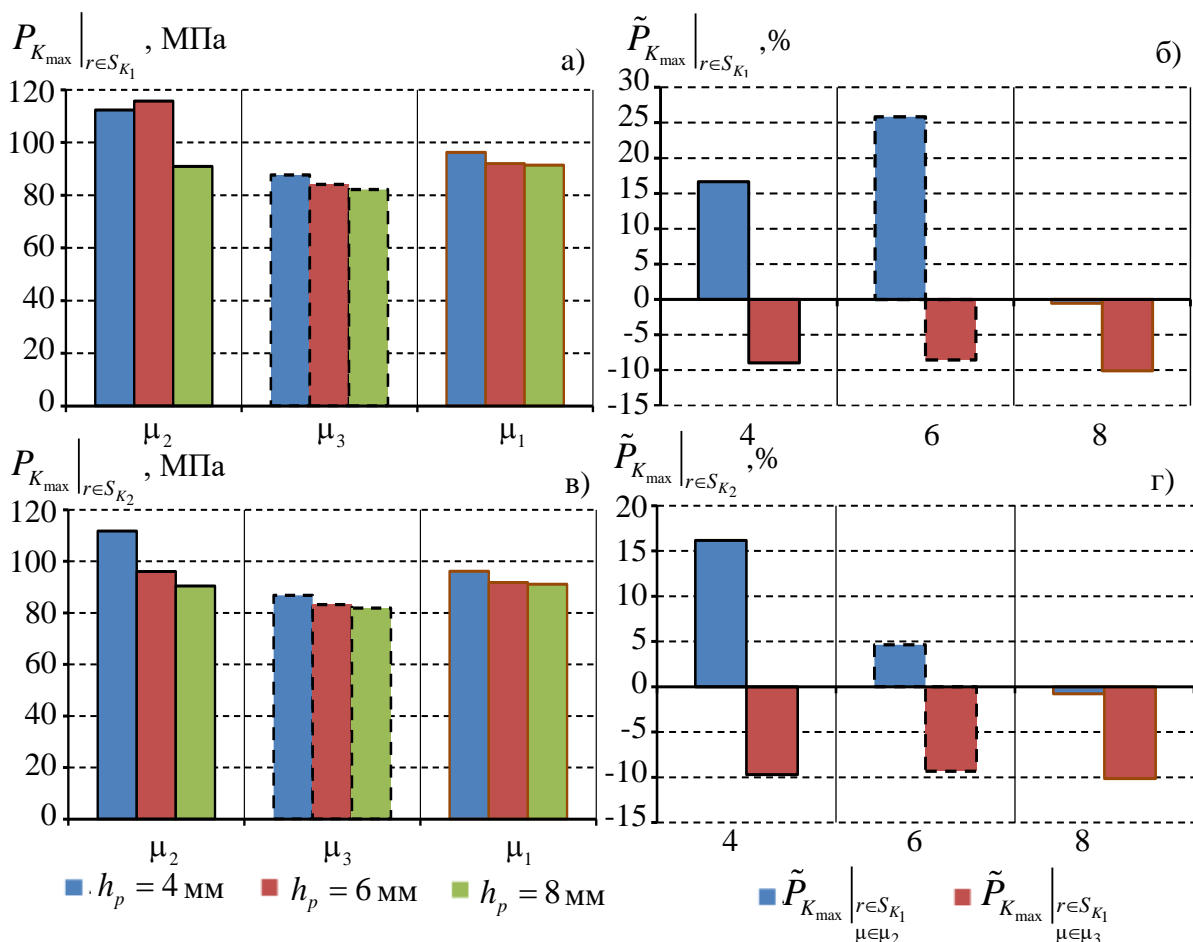


Рис. 5.2.6. Уровень изменения контактного давления в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_1} (а – б) и S_{K_2} (в – г)

Хорошо видно, что фрикционные свойства полимерной прослойки существенно влияют на максимальные значения контактного давления и с увеличением толщины полимерной прослойки мы наблюдаем снижение максимального уровня контактного давления. Максимальные значения контактного давления для этого материала выше, чем у прослойки, выполненной из СВМПЭ производства Германии. Также значения контактного давления существенно выше при фрикционных свойствах у прослойки без смазки относительно коэффициента трения для прослоек с толщиной 4 мм и 6 мм $\sim 21,2\%$ и $\sim 10,4\%$ для поверхностей S_{K_1} и S_{K_2} . На обеих контактных поверхностях при наличии смазочного материала мы наблюдаем уменьшение максимальных значений контактного давления в среднем $\sim 10\%$.

На рис. 5.2.7 представлено влияние фрикционных свойств и толщины прослойки на уровень максимального контактного касательного напряжения.

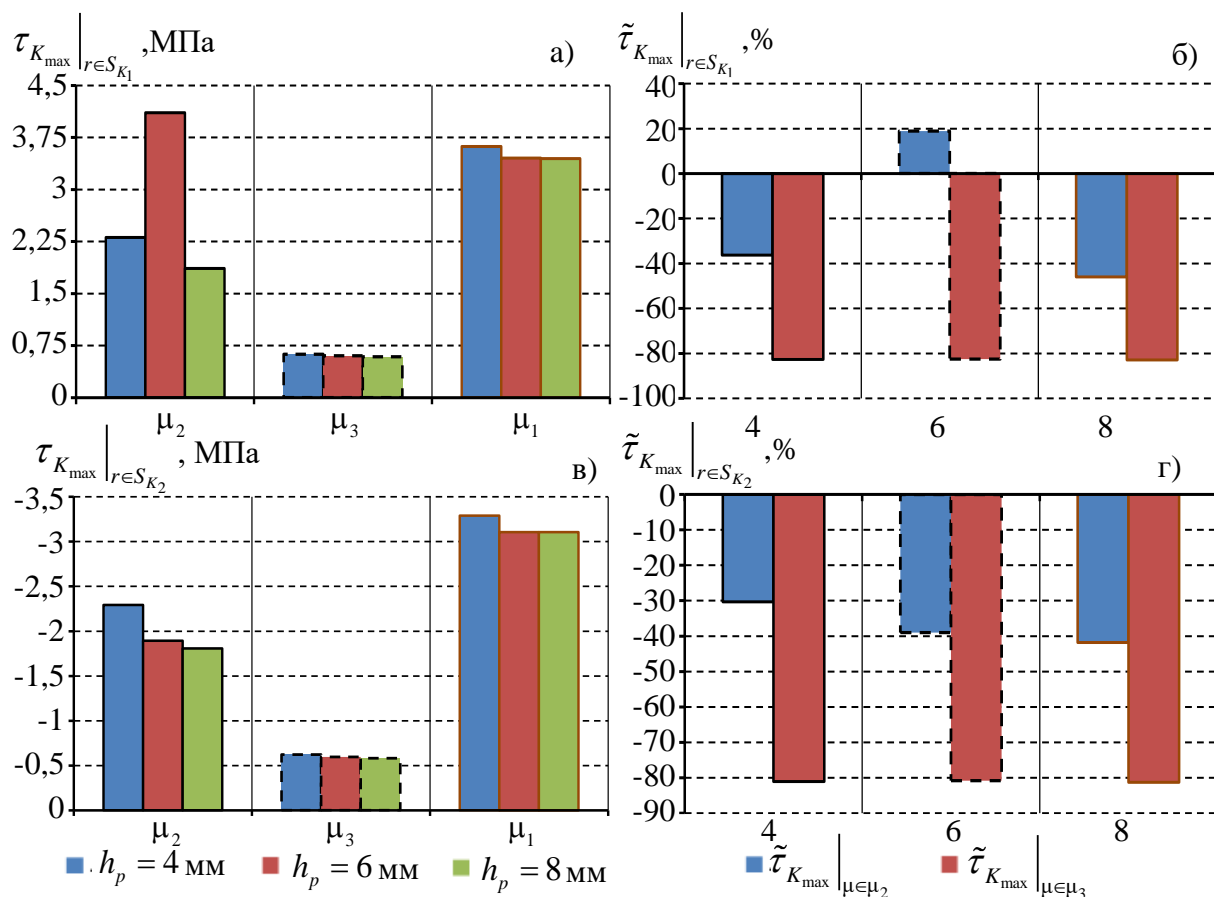


Рис 5.2.7. Уровень изменения контактного касательного напряжения в зависимости от толщины прослойки на S_{K_1} (а – б) и S_{K_2} (в – г)

На данном материале, также хорошо представлено влияние фрикционных свойств материала на максимальный уровень контактного касательного напряжения. Минимальный уровень приходится на фрикционные свойства, где между контактными поверхностями помимо антифрикционной полимерной прослойки присутствовала смазка. Он существенно отличается от уровня при табличном коэффициенте трения и меньше на $\sim 80\%$ на обеих контактных поверхностях. Для прослойки без смазки тоже наблюдаем снижение уровня максимальных значений, в среднем на $\sim 21\%$ и $\sim 37\%$ на поверхностях S_{K_1} и S_{K_2} соответственно.

5.3. Анализ параметров контакта на относительно свободном торце прослойки

На данном этапе работы рассматривается поверхность S_{K_3} , у которой порядка 2 мм приходится на свободную от контакта с другими элементами сферической опорной части поверхность. Для начала рассмотрим прослойку стандартной толщины. На рис.5.3.1 представлены контактные параметры прослоек для всех рассматриваемых материалов и фрикционных свойств.

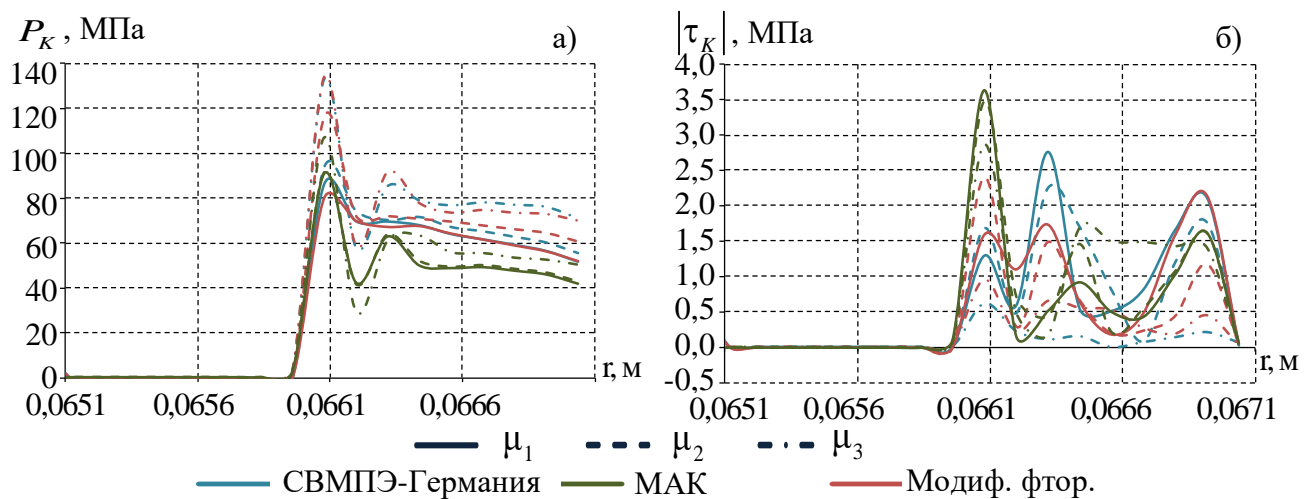


Рис. 5.3.1. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_3} при $h_p = 4$ мм

На рис. 5.3.1 (а) можем наблюдать ярко выраженные пики контактного давления, которые приходятся на зону концентрации напряжения вблизи буртика нижней плиты со сферическим вырезом. Наибольшие и наименьшие значения пиков принадлежат материалам 1, 3 с фрикционными свойствами с учетом смазки и табличным коэффициентом трения соответственно. А вот что касается контактного касательного напряжения (рис. 5.3.1. (б)), то этим материалам при учете смазки принадлежат наименьшие значения, значения без учета смазки и с табличным коэффициентом трения находятся примерно на одном уровне.

Так как мы имеем свободную часть поверхности от контакта, то соответственно в этой области возникают нормальные перемещения. На рис. 5.3.2. представлены график нормальных перемещений и диаграмма зависимости максимальных значений от фрикционных свойств.

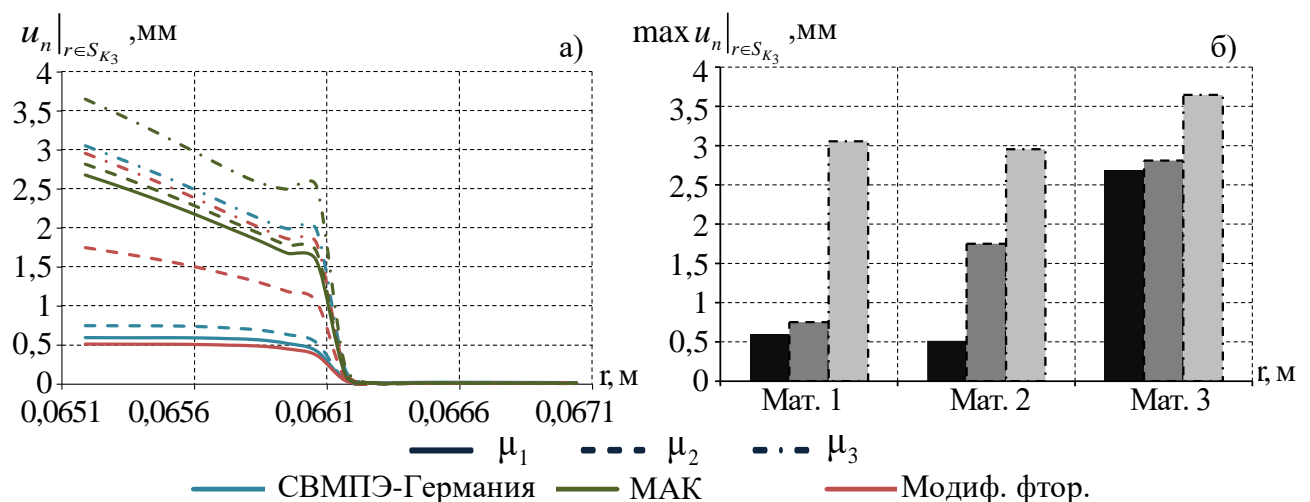


Рис. 5.3.2. Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на поверхности S_{K_3} при $h_p = 4$ мм

На графике хорошо видно, как фрикционные свойства существенно влияют на характеристику материала. Так для всех материалов мы можем заметить, что наибольшие нормальные перемещения принадлежат

фрикционным свойствам полученным экспериментально с использованием смазки. Для СВМПЭ они больше в 5,1 раз относительно табличного коэффициента трения; для композитного материала больше в 5,8 раз от относительно табличного коэффициента трения; для модифицированного фторопласта больше в 1,4 раза относительно табличного коэффициента трения.

Наименьшие нормальные перемещения принадлежат СВМПЭ и композитному материалу. Также можно отметить, что учет фрикционных свойств без смазки для СВМПЭ и модифицированного фторопласта не оказывает существенного влияния на характер поведения графика нормальных перемещений, что нельзя сказать о композитном материале.

На рис. 5.3.3. представлена диаграмма осадки верхней плиты.

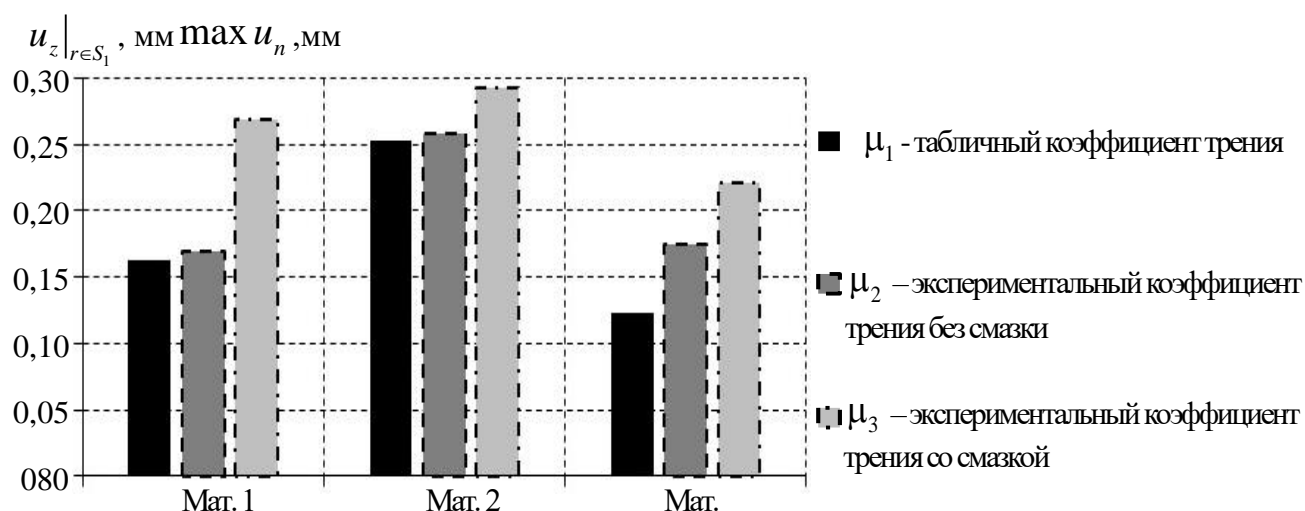


Рис. 5.3.3. Значения осадки верхней плиты для стандартной толщины прослойки

Аналогично предыдущим результатам, максимальные значения осадки для каждого материала принадлежат фрикционным свойствам со смазкой. Однако из всех материалов композит показывает себя наиболее пластичным. У СВМПЭ и композита с фрикционными свойствами без смазки наблюдается увеличение значений лишь на $\sim 4,6\%$ и $\sim 2,1\%$ относительно табличного коэффициента трения соответственно.

Далее рассмотрим влияние толщины полимерной прослойки на контактные параметры, нормальные перемещения и осадку верхней плиты со сферическим сегментом для каждого материала отдельно.

5.3.1. СВМПЭ производства Германия

На рис. 5.3.4 представлены диаграммы максимальных значений контактного давления и влияние учета фрикционных свойств без смазки и со смазкой относительно табличного коэффициента трения на каждой толщине полимерной прослойки.

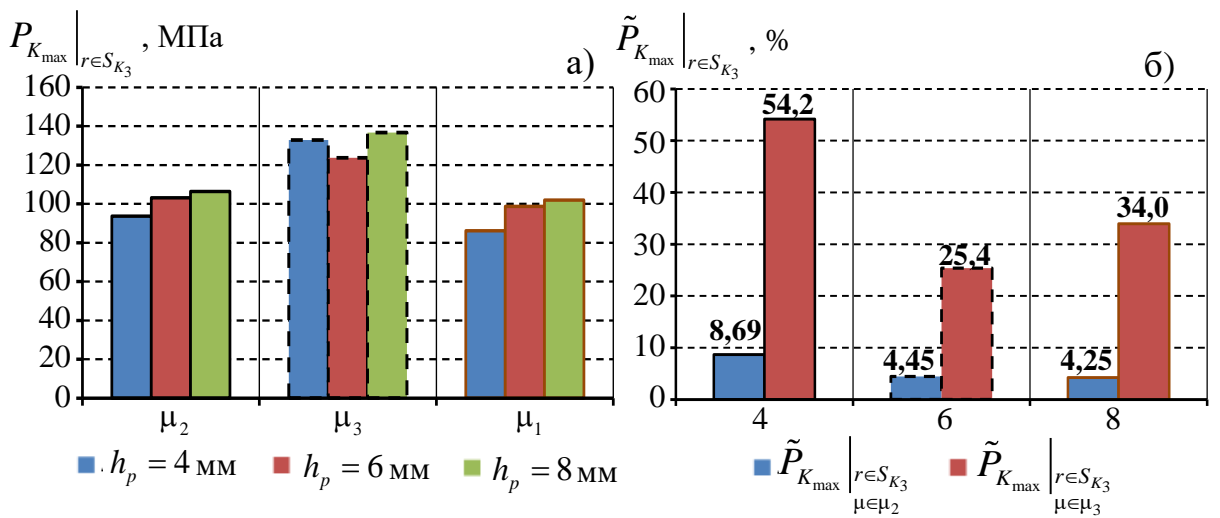


Рис. 5.3.4. Уровень изменения контактного давления в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки и фрикционных свойств на S_{K_3}

Если на основных контактных поверхностях мы наблюдали уменьшение контактного давления при учете фрикционных свойств со смазкой, то здесь же мы наблюдаем противоположную картину. Уровень контактного давления увеличивается на 54 %, 25 % и 34 % для прослоек толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно. Однако уровень контактного давления для прослойки с фрикционными свойствами без смазки увеличился незначительно, в среднем для каждой толщины на $\sim 5,8$ %.

На рис. 5.3.5 рассматриваются диаграммы максимальных значений контактного касательного напряжения и уровень изменения относительно табличного коэффициента трения.

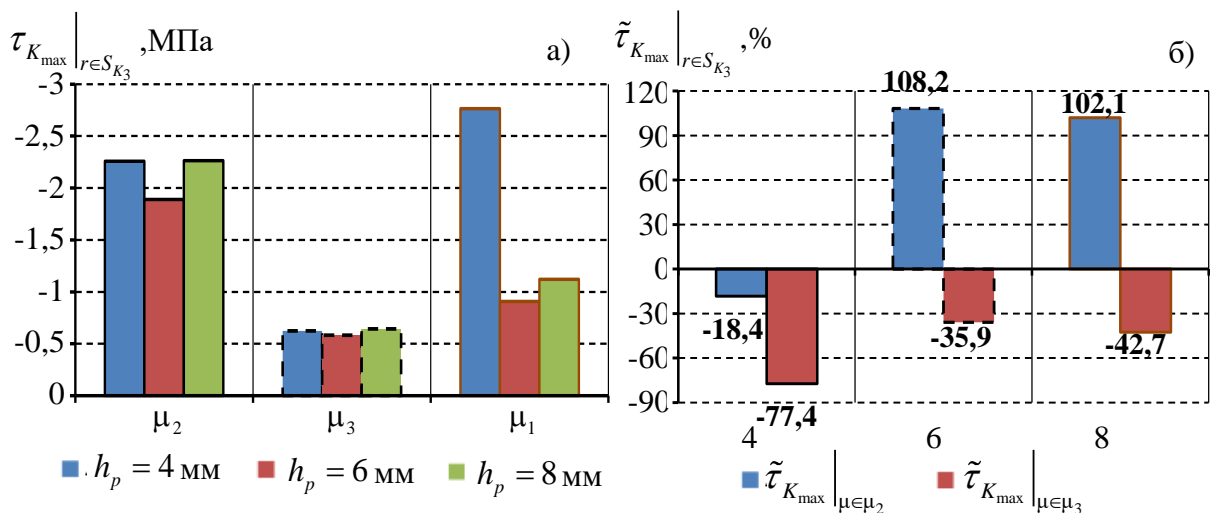


Рис. 5.3.5. Уровень изменения контактного касательного напряжения в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_3}

Проводя анализ значений контактного касательного напряжения на поверхности S_{K_3} , нельзя не отметить, что его уровень, при табличном коэффициенте трения и при фрикционных свойствах полученных экспериментально для прослойки без смазки, ниже, чем его уровень на основных контактных поверхностях. Что касается контактного касательного

напряжения при фрикционных свойствах для прослойки со смазкой, то для этой поверхности оно имеет наименьшие значения, а относительно основных контактных поверхностей оно немногим больше их значений.

Относительно табличного коэффициента трения контактное касательное напряжение значительно ниже при фрикционных свойствах со смазкой.

Рассмотрим уровень изменения максимальных значений нормальных перемещений от фрикционных свойств, полученных экспериментально относительно табличного коэффициента трения в процентном соотношении, который в свою очередь был рассчитан по формуле:

$$\Delta u_{n_{\max}} = \frac{\left(u_{n_{\max}} - u_{n_{\max}} \Big|_{\mu=\mu_1} \right)}{u_{n_{\max}} \Big|_{\mu=\mu_1}} * 100\% , \quad (5.3)$$

На рис. 5.3.6 представлены вычисленные значения уровня изменений максимальных перемещений, а также диаграмма самих максимальных значений нормальных перемещений.

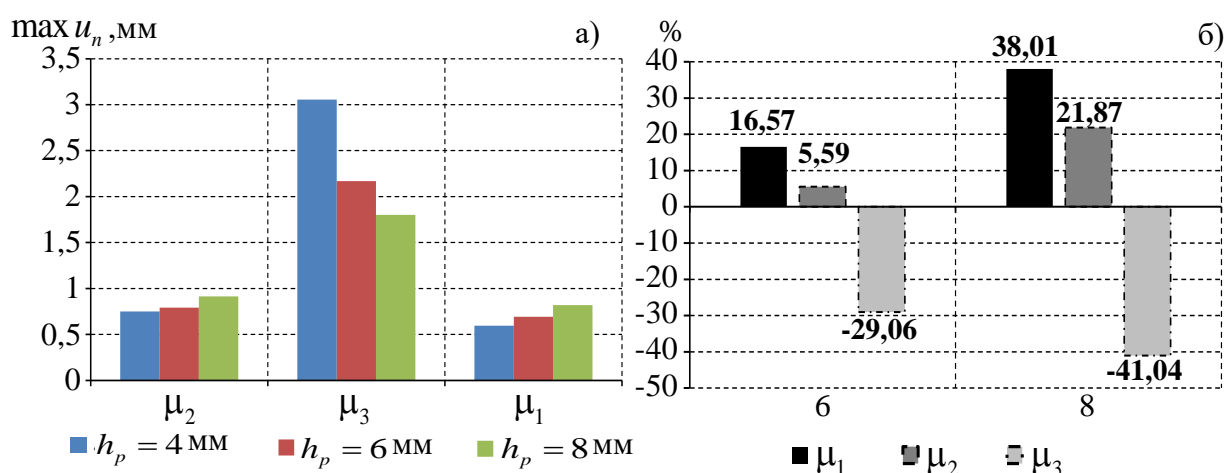


Рис. 5.3.6. Максимальные перемещения на каждой толщине (а) и изменение максимальных перемещений относительно табличного коэффициента трения

При табличном коэффициенте трения и коэффициенте трения без смазки с увеличением толщины полимерной антифрикционной прослойки наблюдается и незначительный рост максимальных значений перемещений. Однако при коэффициенте трения со смазкой наблюдается характерный спад уровня максимальных значений (рис. 5.3.6 (б)).

Значения максимальных значений перемещений при коэффициенте трения без смазки немногим выше относительно значений при табличном коэффициенте трения: ~ 26,4 %, ~ 14,5 %, ~ 11,6 %; значения при коэффициенте трения со смазкой существенно больше относительно значений при табличном коэффициенте трения: ~ 414,6 %, ~ 213,1%, ~ 119,8 % – для прослоек толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно.

На рис. 5.3.7 рассмотрим изменение осадки верхней плиты со сферическим сегментом от учета фрикционных свойств вычисленных экспериментально относительно табличного коэффициента трения.

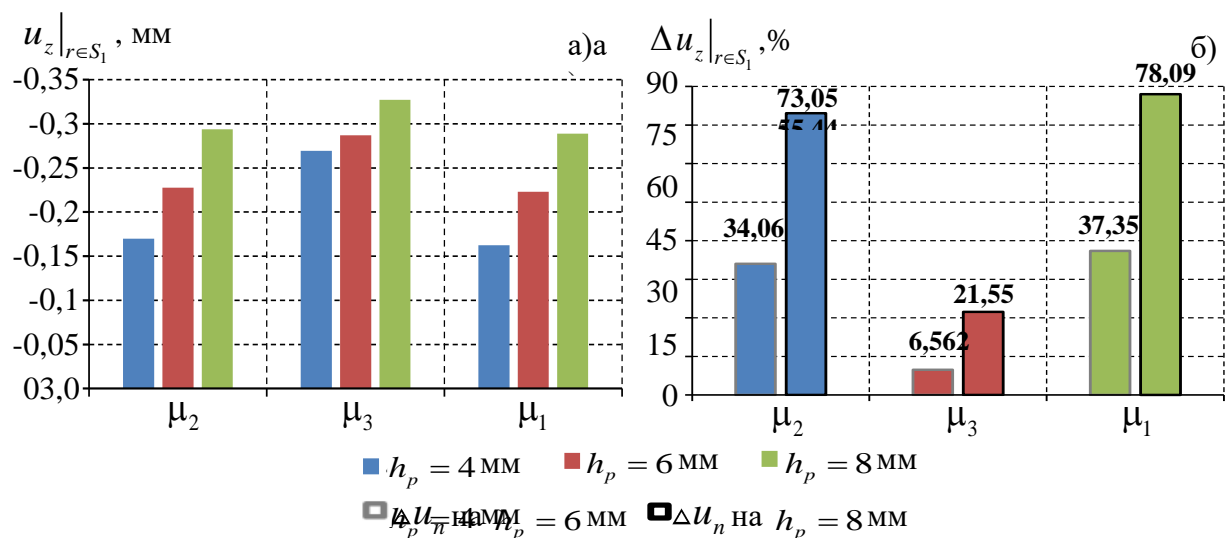


Рис. 5.3.7. Значения осадки верхней плиты при различной толщине полимерной прослойки (а), уровень изменения осадки в зависимости от изменения толщины прослойки относительно $h_p = 4$ мм в процентном соотношении (б)

Наибольшие значения осадки верхней плиты принадлежат прослойке при коэффициенте трения со смазкой, однако при варьировании толщины полимерной прослойки при этом коэффициенте мы наблюдаем наименьшие изменения (рис. 5.3.7. (б)). Значения осадки при μ_2 выше значений при μ_1 в среднем всего на $\sim 2,8$ %. А значения осадки при μ_3 превышают значения осадки при μ_1 на $\sim 65,9$ %, $\sim 28,7$ %, $\sim 13,3$ % для прослойки толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно. Также можно отметить, что при увеличении толщины полимерной прослойки разница между значениями осадки плиты при коэффициентах трения полученных экспериментально и табличным коэффициентом трения – уменьшается.

5.3.2. Антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена

Теперь рассмотрим относительно свободную от контакта поверхность уже на композитном материале, диаграммы значений контактного давления представлены на рис. 5.3.8.

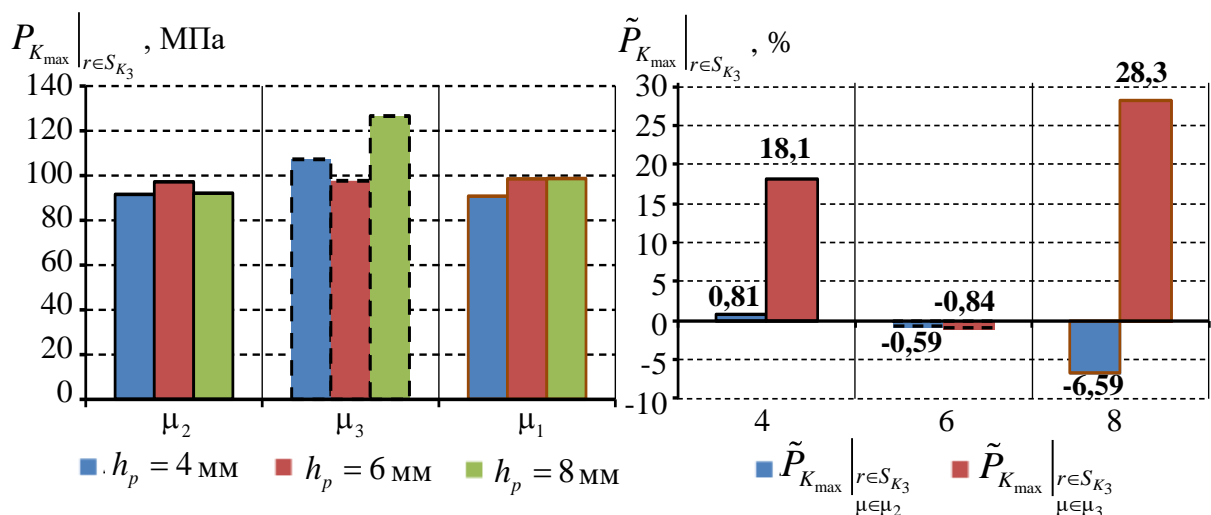


Рис. 5.3.8. Уровень изменения контактного давления в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_3}

Контактное давление при коэффициенте трения без смазки для полимерных прослойки толщиной 6 мм практически не имеет различий относительно табличного коэффициента трения ($<1\%$), а на толщине 8 мм имеет значения меньше на $\sim 6,6\%$. Контактное давление при коэффициенте трения со смазкой больше на $\sim 18,1\%$ и $\sim 28,3\%$ относительно μ_1 для прослоек толщиной 4 мм и 8 мм соответственно. На прослойке толщиной 6 мм разница значений контактного давления для прослоек с различными фрикционными свойствами составляет $<1\%$.

На рис. 5.3.9 рассмотрены максимальные значения контактного касательного напряжения и влияние фрикционных свойств на его уровень.

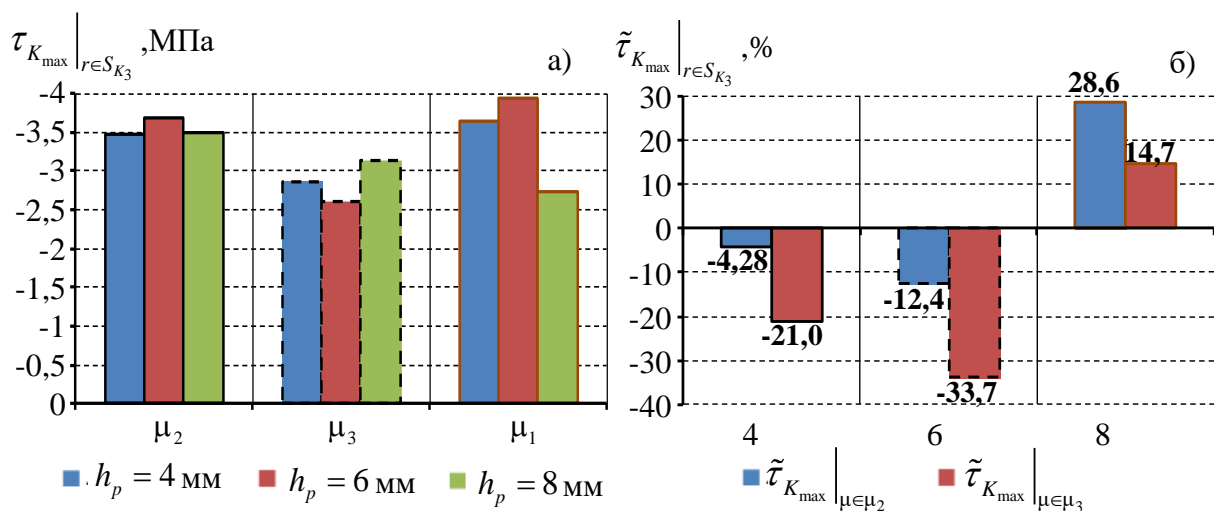


Рис. 5.3.9. Максимальные значения контактного касательного напряжения для всех толщин антифрикционной полимерной прослойки (а) и уровень изменения в зависимости от фрикционных свойств (б) на S_{K_3}

Если рассматривать контактное касательное напряжение относительно основных контактных поверхностей, то можно отметить, что на поверхности S_{K_3} уровень его становится ниже. Но не наблюдается тот спад значений контактного касательного напряжения при увеличении толщины полимерной

прослойки, который наблюдался на тех поверхностях. Что касается влияния фрикционных свойств, то на прослойках толщиной 4 мм и 6 мм наблюдается снижение уровня максимального контактного касательного напряжения относительно μ_1 , однако для прослойки толщиной 8 мм не только не наблюдается снижение значения, но и происходит повышение уровня контактного касательного напряжения (рис. 5.3.9 (б)).

Далее на рис. 5.3.10 рассмотрим максимальные значения нормальных перемещений и уровень изменения относительно толщины антифрикционной полимерной прослойки

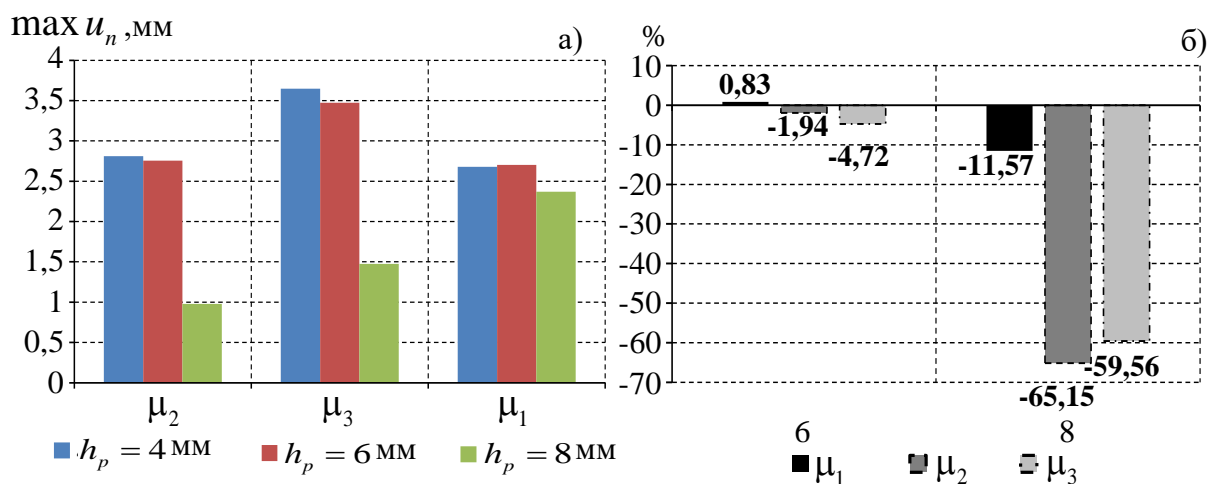


Рис. 5.3.10. Максимальные перемещения на каждой толщине (а) и изменение максимальных перемещений относительно толщины $h_p = 4$ мм

На диаграммах хорошо заметен спад максимальных значений нормальных перемещений при увеличении толщины полимерной антифрикционной прослойки. Но, конечно же, больше всего происходит изменение при толщине прослойки 8 мм относительно прослойки стандартной толщины. Но если проводить анализ по фрикционным свойствам, то здесь можно отметить, что значения при μ_2 выше на $\sim 2,1$ %, $\sim 0,8$ %, $\sim 2,5$ % относительно μ_1 на прослойках толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно. При μ_3 выше на $\sim 15,9$ %, $\sim 10,1$ %, $\sim 2,7$ % относительно μ_1 на прослойках толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно.

Рис. 5.3.11 показывает диаграммы максимальных значений осадки для оценки влияния фрикционных свойств материала и толщины полимерной прослойки, выполненной из композитного материала.

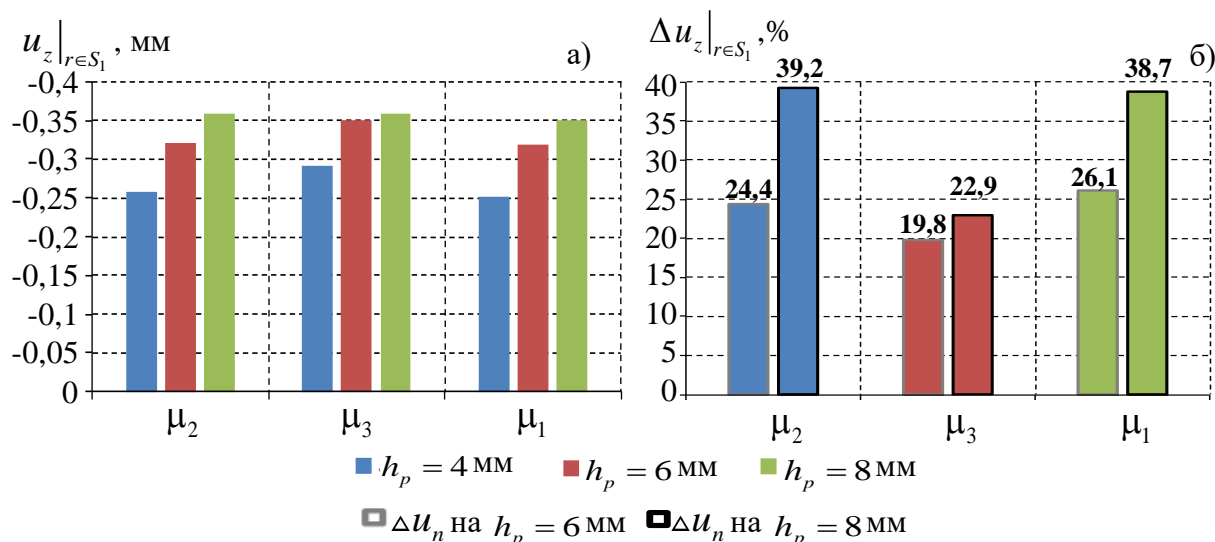


Рис. 5.3.11. Значения осадки верхней плиты при различной толщине полимерной прослойки (а), уровень изменения осадки в зависимости от изменения толщины прослойки относительно $h_p = 4$ мм в процентном соотношении (б)

На полимерной прослойке из композитного материала мы наблюдаем наименьшее влияние фрикционных свойств на значения осадки верхней плиты со сферическим сегментом по сравнению с другими материалами (см. 4.3.1 и 4.3.3). Так относительно μ_1 для μ_2 увеличение значений не превышает 2,5 % для каждой толщины полимерной прослойки, а для μ_3 увеличение значений не велики и составляют $\sim 15,9$ %, $\sim 10,1$ %, $\sim 2,68$ % для прослоек толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно. А в целом влияние толщины прослойки на значения при разных фрикционных свойствах в среднем схожи и составляют $\sim 28,5$ %.

5.3.3. Модифицированный фторопласт

На рис. 5.3.12, 5.3.13 представлены максимальные значения контактных параметров и влияние фрикционных свойств на них.

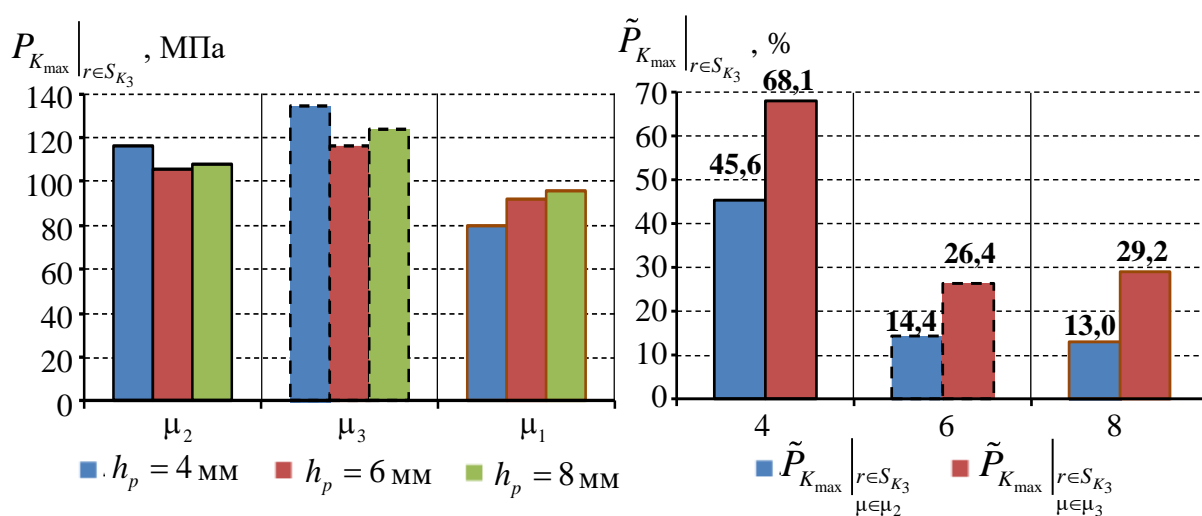


Рис. 5.3.12. Уровень изменения контактного давления в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки на S_{K_3} (а – б)

При увеличении толщины полимерной антифрикционной прослойки при табличном коэффициенте трения наблюдается равномерный рост значений, что,

однако, не скажешь о значения при коэффициентах трения полученных экспериментально, на них можно наблюдать беспорядочное уменьшение максимальных значений контактного давления. Для прослойки стандартной толщины значения при экспериментальных коэффициентах трения значительно выше (в среднем на 57 %). А для прослоек толщиной 6 мм и 8 мм имеем не такой большой разброс значений и отличаются они примерно на один уровень: при μ_2 в среднем выше на ~ 13,7 % для обеих толщин, при μ_3 в среднем выше на ~ 27,8 % относительно табличного коэффициента трения.

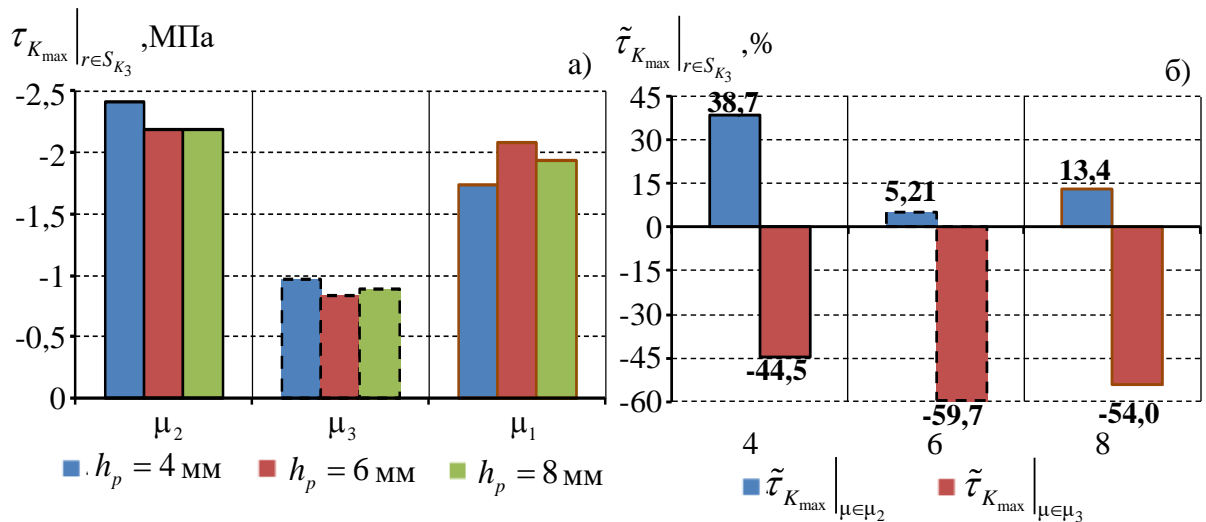


Рис. 5.3.13. Уровень изменения контактного касательного напряжения в зависимости от толщины антифрикционной полимерной прослойки и фрикционных свойств на S_{K_3}

Толщина полимерной прослойки, выполненной из модифицированного фторопласта, неоднозначно влияет на контактное касательное напряжение. Зато, что касается фрикционных свойств, то здесь можно сказать точно, что при коэффициенте трения со смазкой максимальные значения контактного касательного напряжения ниже, нежели при табличном коэффициенте трения (рис. 5.3.13(б)). А при коэффициенте трения без смазки значения больше на ~38,7 %, ~ 5,21 %, ~ 13,4 % относительно табличного коэффициента трения на прослойках толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно.

На рис.5.3.14 представлены вычисленные по формуле (5.3) значения уровня изменений максимальных перемещений.

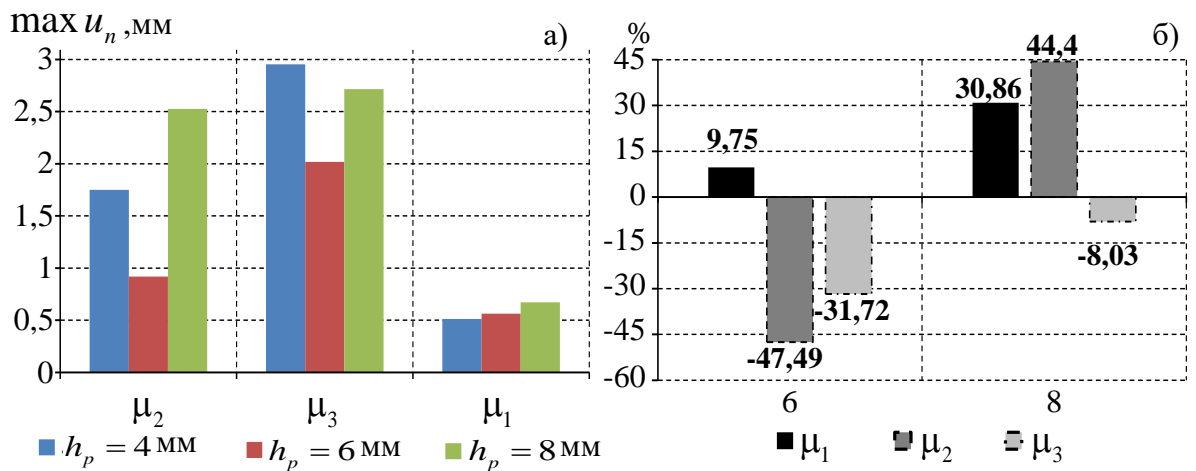


Рис. 5.3.14. Максимальные перемещения на каждой толщине (а) и изменение максимальных перемещений относительно толщины $h_p = 4$ мм

Максимальные значения нормальных перемещений при табличном коэффициенте трения имеют плавный рост при варьировании толщины антифрикционной прослойки. Что не наблюдается у максимальных значений при коэффициентах трения полученных экспериментально (рис. 5.3.14(б)).

При коэффициенте трения без смазки значения увеличиваются на прослойках толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм на $\sim 241,1$ %, $\sim 63,2$ %, $\sim 276,4$ % соответственно, при коэффициенте трения со смазкой значения увеличиваются на прослойках толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм на $\sim 475,8$ %, $\sim 278,3$ %, $\sim 304,7$ % соответственно. Результаты представлены при учете табличных фрикционных свойств материала антифрикционной полимерной прослойки.

Для оценки влияния фрикционных свойств материалов и толщины антифрикционной прослойки на рис. 5.3.15 показан уровень изменения значений осадки моделей опорной части.

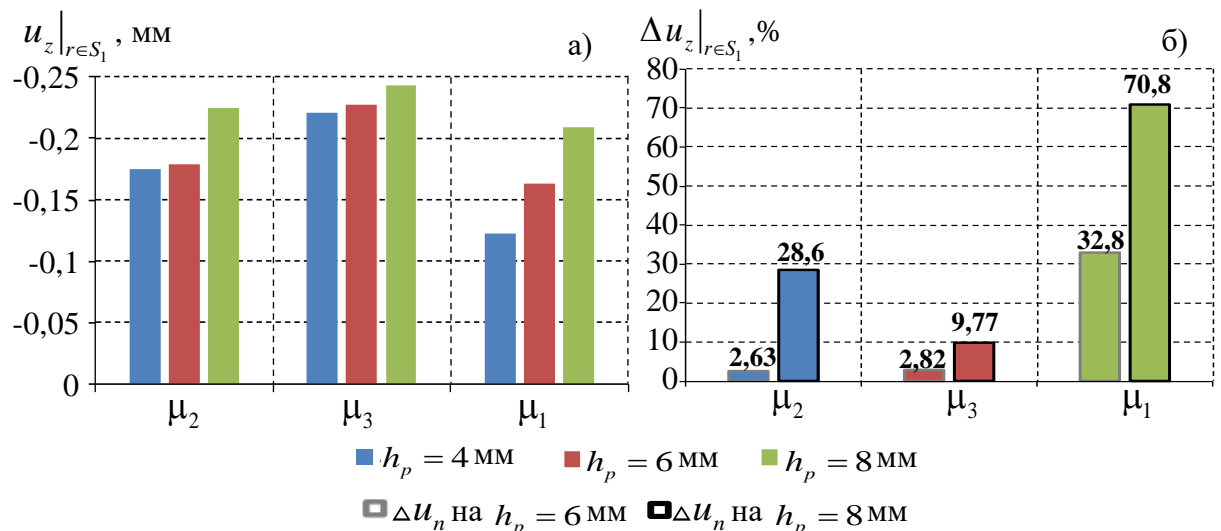


Рис. 5.3.15. Значения осадки верхней плиты при различной толщине полимерной прослойки (а), уровень изменения осадки в зависимости от изменения толщины прослойки относительно $h_p = 4$ мм в процентном соотношении (б)

Наибольшие значения осадки наблюдаются при μ_3 , однако толщина полимерной антифрикционной прослойки на значения особо не влияет, до 10%. А вот значения осадки верхней плиты при μ_1 имеют обратную картину – наименьшие максимальные значения, и большую зависимость от толщины полимерной прослойки, вплоть до 70 %.

При исследовании можно заметить, что при увеличении толщины полимерной прослойки влияние фрикционных свойств материала на значения осадки уменьшается. Так, например, при μ_2 мы наблюдаем увеличение значений на $\sim 42,2$ %, $\sim 9,93$ %, $\sim 7,11$ %; при μ_3 мы наблюдаем увеличение значений на $\sim 80,6$ %, $\sim 39,8$ %, $\sim 16,1$ % – относительно табличного коэффициента трения μ_1 для полимерный прослоек толщиной 4 мм, 6 мм, 8 мм соответственно.

5.4. Анализ интенсивности напряжения и пластических деформаций

На рис. 5.4.1. – 5.4.2. продемонстрированы интенсивность напряжения и интенсивность пластических деформаций соответственно для прослойки стандартной толщины $h_p = 4$ мм, выполненной из модифицированного фторопласта, имеющей различные фрикционные свойства.

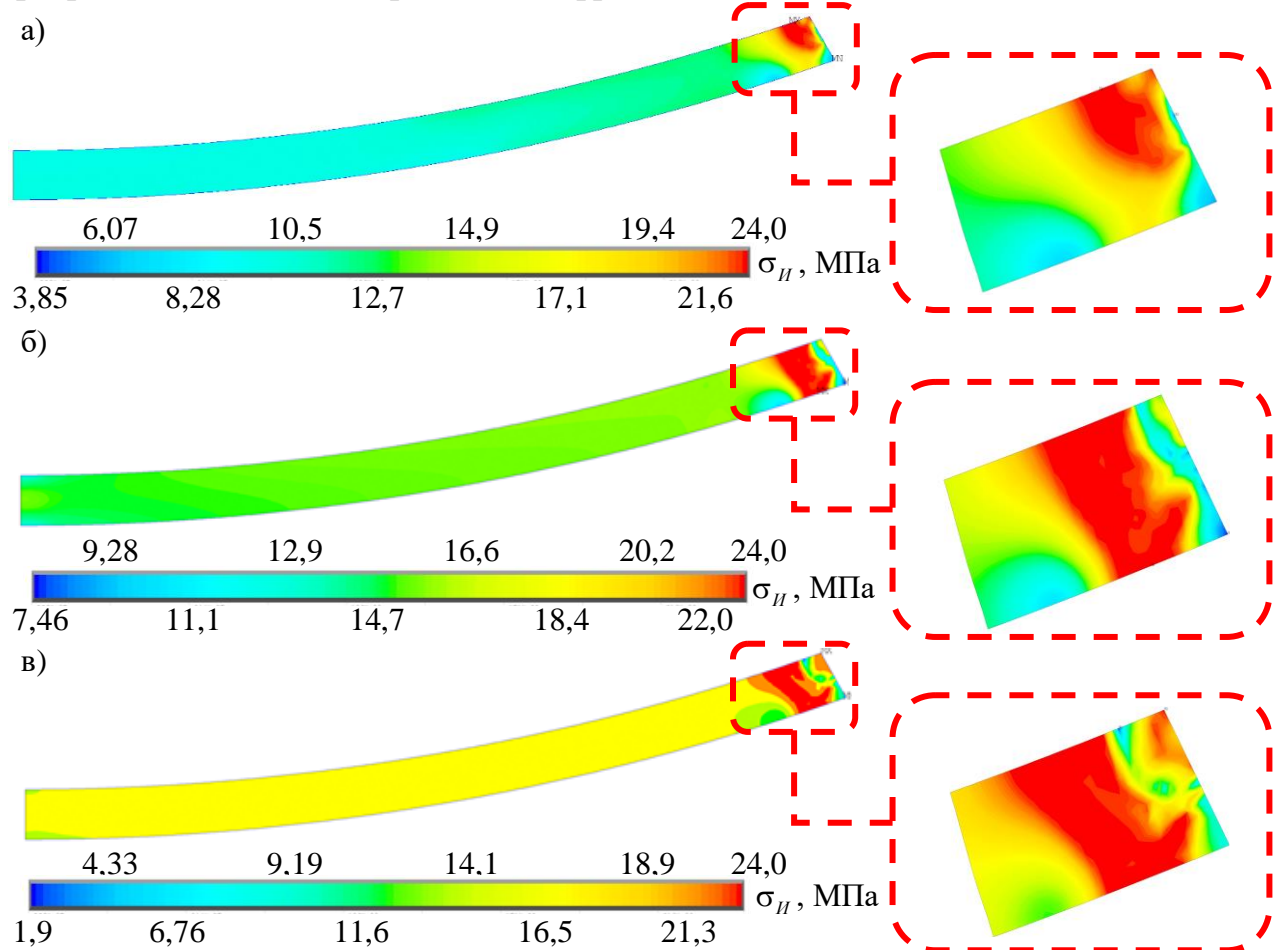


Рис. 5.4.1. Интенсивность напряжений на толщине $h_p = 4$ мм при различных фрикционных свойствах модифицированного фторопласта (а – табличный коэффициент трения, б-в – коэффициенты трения, полученные экспериментально без смазки и со смазкой соответственно), МПа

На рис. 5.4.1 можно хорошо заметить, как фрикционные свойства материала полимерной антифрикционной прослойки существенно влияют на минимальные значения интенсивности напряжений и его распределении по всей площади полимерной прослойки. Так наименьшие значения мы наблюдаем у прослойки при экспериментальном коэффициенте трения со смазкой (рис. 5.4.1 (в)). Однако заметно, что по всей площади на этой прослойке распределена наибольшая интенсивность напряжения, по сравнению с другими прослойками. Для прослойки с коэффициента трения без смазки мы наблюдаем наибольший уровень минимального значения интенсивности напряжений.

Как можно заметить, фрикционные свойства материала не влияют на максимальное значение интенсивности напряжений, но оно имеет влияние на его распределение, а точнее сказать площадь распределения. В целом максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается около относительно свободного края прослойки, возникает концентрация напряжений.

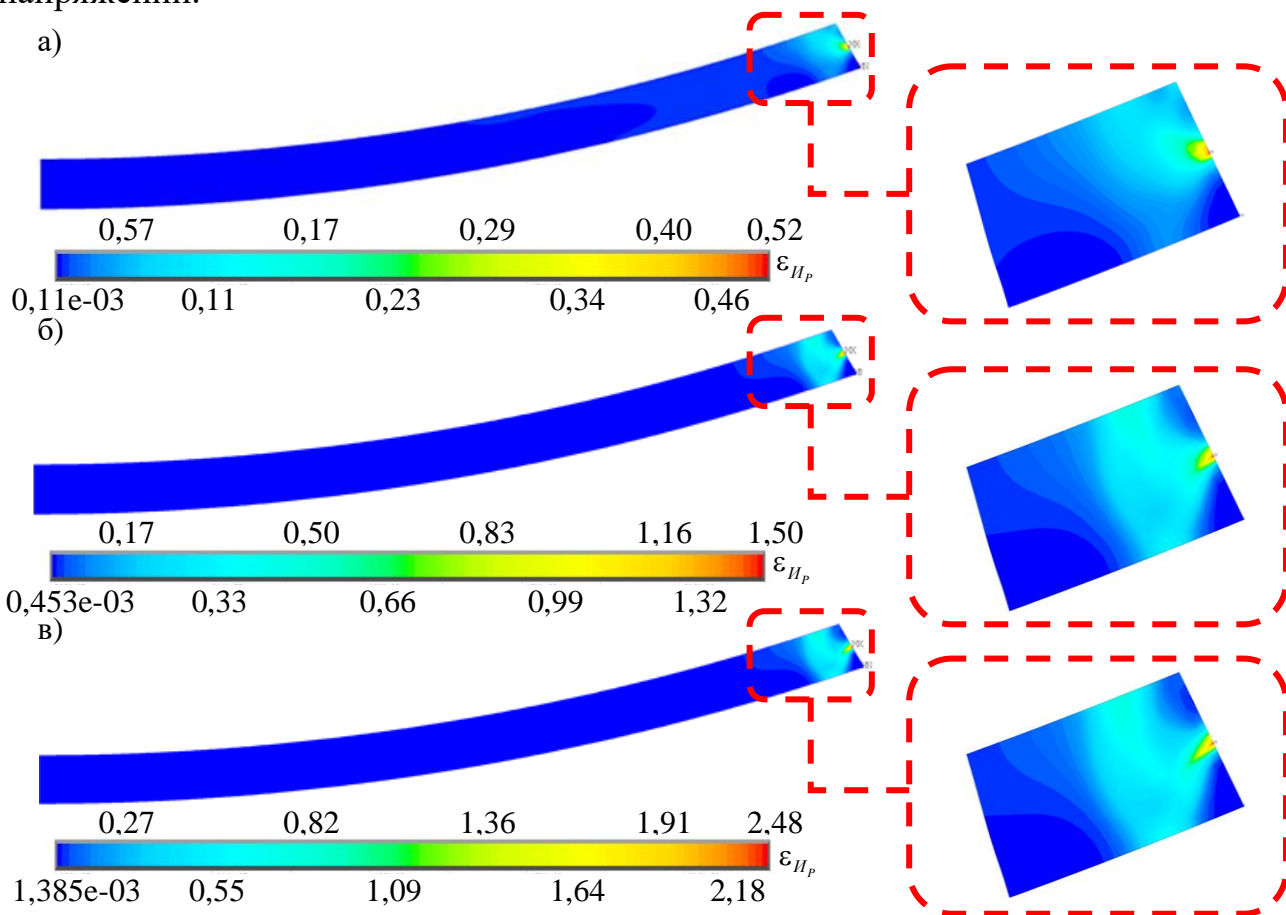


Рис. 5.4.2. Интенсивность пластических деформаций на толщине $h_p = 4$ мм при различных фрикционных свойствах модифицированного фторопласта (а – табличный коэффициент трения, б–в – коэффициенты трения, полученные экспериментально без смазки и со смазкой соответственно)

Что касается интенсивности пластических деформаций, то фрикционные свойства материала влияют не только на минимальные значения, но и на максимальные значения пластических деформаций. И таким образом

наименьший уровень пластических деформаций мы наблюдаем при табличном коэффициенте трения, а наибольший уровень пластических деформаций наблюдается при экспериментальном коэффициенте трения со смазкой. Так же фрикционные свойства влияют на характер распределения пластических деформаций у относительно свободного края, где наблюдается концентрация напряжений. Большая часть антифрикционной прослойки работает в рамках теории упругости.

В таблице 5.4.1 представлены максимальные значения интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций для прослойки стандартной толщины.

Таблица 5.4.1

Максимальные значения интенсивности напряжений и пластических деформаций

№ материала	σ_{II} , МПа	ε_{IIp}		
		μ_1	μ_2	μ_3
СВМПЭ производства Германии	24,2	3,88	4,27	4,34
МАК с бронзовыми сферическими включениями	16,2	2,71	1,49	0,54
Модифицированный фторопласт	24,0	3,85	7,46	1,90

У прослоек из композитного материала наблюдается наименьший уровень интенсивности напряжений/пластических деформаций при различных фрикционных свойствах. Остальные материалы имеют средние показатели.

Далее рассмотрим влияние не только фрикционных свойств материала, но и толщины полимерной прослойки на интенсивность пластических деформаций. Заметим, что при изменении толщины полимерной антифрикционной прослойки изменения максимальных значений интенсивности напряжений не наблюдаются.

На рис. 5.4.3 представлены максимальные значения интенсивности пластических деформаций и уровень изменения их на каждой толщине при различных фрикционных свойствах для СВМПЭ производства Германии.

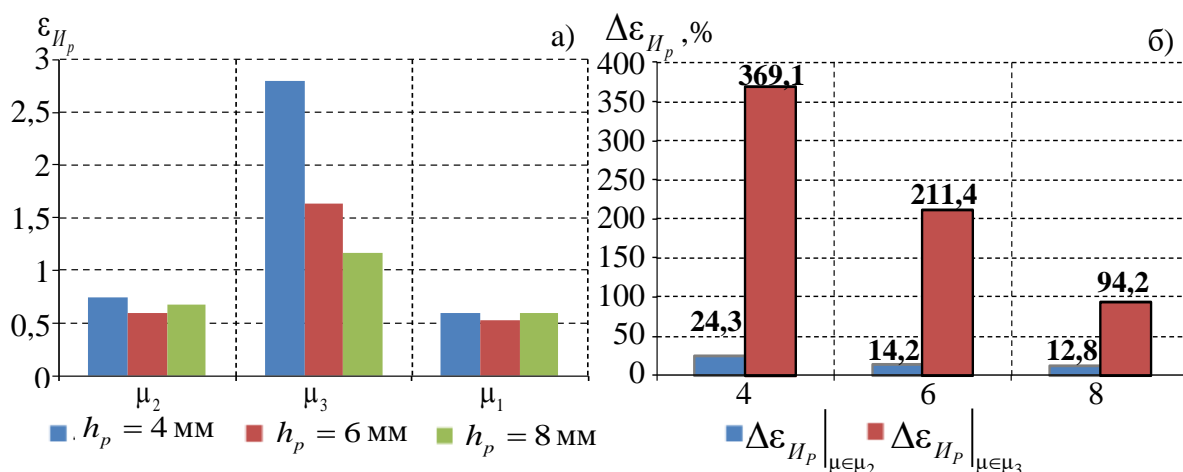


Рис. 5.4.3. Диаграмма максимальных значений интенсивности пластических деформаций (а) и фрикционных свойств полимерной прослойки на них (б) из СВМПЭ производства Германии

На диаграммах хорошо видно, что для всех толщин значения интенсивности пластических деформаций при коэффициенте трения без смазки достаточно близки к значениям интенсивности пластических деформаций при табличном коэффициенте трения. Что нельзя сказать о значениях при коэффициенте трения со смазкой. Тут мы наблюдаем существенное увеличение значений, вплоть до 370 % относительно табличного коэффициента трения. Но при увеличении толщины полимерной прослойки присутствует ярко выраженное уменьшение уровня изменений между экспериментальными и табличными коэффициентами трения.

На рис. 5.4.4 представлены значения интенсивности пластических деформаций, но уже для композитного материала.

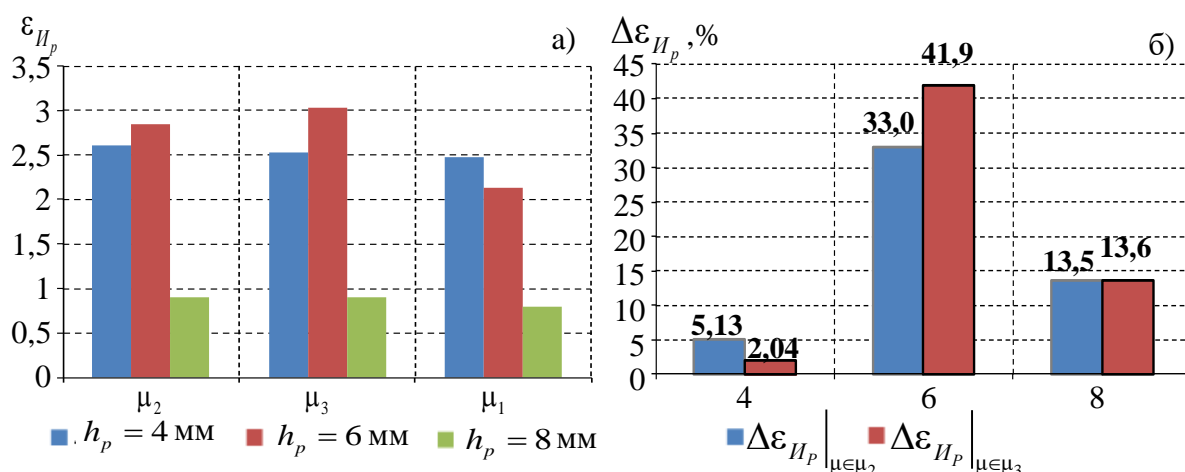


Рис. 5.4.4. Диаграмма максимальных значений интенсивности пластических деформаций (а) и фрикционных свойств полимерной прослойки на них (б) из МАК со сферическими бронзовыми включениями

По сравнению с СВМПЭ на прослойке из композитного материала не наблюдается такой разрыв значений. На данном материале максимальная разница значений происходит на прослойке толщиной 6 мм, при экспериментальных коэффициентах трения наблюдается увеличение на 33 % и 42 % – без смазки и со смазкой соответственно, относительно табличного коэффициента трения. Для прослойки толщиной 4 мм, наблюдаем минимальное увеличение значений, которое не превышает 5,5 %. А на прослойке толщиной 8 мм для обоих коэффициентов трения значения увеличиваются в среднем на 13,55 % относительно табличного коэффициента трения.

Далее рассмотрим значения интенсивности пластических деформаций с прослойкой из модифицированного фторопласта на рис. 5.4.5.

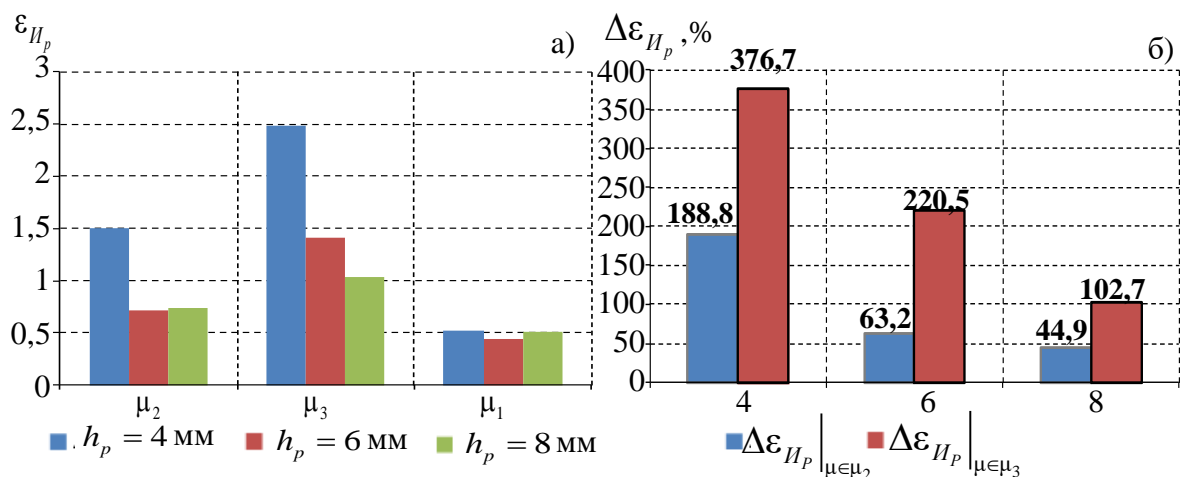


Рис. 5.4.5. Диаграмма максимальных значений интенсивности пластических деформаций (а) и фрикционных свойств полимерной прослойки на них (б) из модифицированного фторопласта

На диаграмме заметно при увеличении толщины полимерной прослойки уменьшение уровня изменений от фрикционных свойств. Так для прослойки толщиной 8 мм уровень изменения меньше в среднем в 4 раза меньше чем для прослойки толщиной 4 мм. Наибольшие значения интенсивности пластических деформаций наблюдаются при μ_3 , а наименьшие при μ_1 .

5.5. Выводы по главе

Выполнен анализ влияния фрикционных свойств в отдельности и в совокупности с изменением толщины полимерной прослойки в численной реализации фрикционного контактного взаимодействия верхней плиты со сферическим сегментом и нижней плиты со сферическим вырезом опорной части через упругопластическую антифрикционную полимерную прослойку:

- В рамках реализации задачи рассмотрено три материала (СВМПЭ производства Германии, МАК со сферическими бронзовыми включениями, модифицированный фторопласт).

- На основных поверхностях контакта S_{K_1} и S_{K_2} минимальные значения контактных параметров наблюдается при фрикционных свойствах материала (СВМПЭ, модифицированный фторопласт) со смазкой, полученных экспериментально. Наибольшие значения параметров наблюдаются у композиционного материала при табличном коэффициенте трения.

- Выявлено снижение площади контакта, связанное с расхождением контактных поверхностей: для СВМПЭ производства Германии при μ_3 – 2,55 % от первоначальной площади контакта; для композитного материала при μ_1 , μ_2 – на 2,18 %, μ_3 – 2,91 % от первоначальной площади контакта; для модифицированного фторопласта при μ_2 – на 1,45 %, μ_3 – 2,55 % от первоначальной площади контакта.

- Для каждой толщины прослойки происходит уменьшение контактных параметров при экспериментально полученным коэффициенте трения со смазкой, относительно табличного коэффициента трения.

– На относительно свободной от контакта поверхности S_{K_3} при наименьшем уровне контактного касательного напряжения возникает наибольший уровень контактного давления при полученных экспериментально фрикционных свойствах материала со смазкой.

– Выявлено, что при фрикционных свойствах полученных экспериментально относительно табличного коэффициента трения увеличилась площадь распределения максимальных значений интенсивности напряжений/пластических деформаций.

– Прослойки из композиционных материалов обладают наименьшим уровнем пластических деформаций и интенсивности напряжений. При этом по сравнению с другими материалами они испытывают больший уровень деформации при меньшем уровне напряжений.

Заключение

Рассмотрено 6 материалов прослойки (3 – СВМПЭ разных фирм, 2 – композиционных материала и модифицированный фторопласт).

Выполнена численная реализация задачи Герца о деформировании полупространства из полимерных материалов и композитов на их основе жестким стальным сферическим штампом:

- Установлено хорошее количественное и качественное соответствие результатов решения контактной задачи в программном комплексе ANSYS с аналитическим решением задачи (не более 4 %).

- Выполнена оценка деформационного поведения контактного узла по максимальному уровню интенсивностей напряжений и деформаций.

- Провели сравнение упругой и упругопластической постановки задачи. Вывели, что в упругой постановке задачи зона контакта меньше, чем в упругопластической, а это ведет к тому, что средний уровень контактного давления выше, чем в упругопластической постановке, примерно ~ на 45%.

Выполнен численный анализ деформационного поведения элементов сферической опорной части в рамках реализации фрикционного контактного взаимодействия верхней плиты со сферическим сегментом и нижней плиты со сферическим вырезом опорной части через упругопластическую полимерную прослойку:

- Провели анализ контактных параметров для стандартной толщины полимерной антифрикционной прослойки и деформирование относительно свободного края антифрикционной прослойки. Для большинства прослоек из рассматриваемых материалов расхождения контактных поверхностей не наблюдается, снижение площади контактной поверхности, связанное с расхождением контактных поверхностей, наблюдается у прослоек из материалов 4 – 5 и составляет 4-5 % от первоначальной площади контакта. На поверхности относительно свободного края прослойки наименьшие значения контактного давления наблюдаются в прослойках из материалов 3, 6.

- Провели сравнение контактных характеристик при изменении толщины полимерной антифрикционной прослойки и выявили, что наибольшее влияние толщина полимерной прослойки оказывает на композиционные материалы.

- Выполнили анализ осадки сферической опорной части, рассмотрели интенсивность напряжений и пластических деформаций. Наименьшая осадка сферической опорной части наблюдаются у опорных частей с антифрикционными прослойками из материалов 1 – 3, 6, осадка опор с антифрикционными прослойками из композиционных материалов приблизительно в 1,5-2 раза больше.

Выполнен анализ влияния фрикционных свойств в отдельности и в совокупности с изменением толщины полимерной прослойки для данной численной реализации фрикционного контактного взаимодействия:

- В рамках реализации задачи рассмотрено три материала (СВМПЭ производства Германии, МАК со сферическими бронзовыми включениями, модифицированный фторопласт).

– На основных поверхностях контакта S_{K_1} и S_{K_2} минимальные значения контактных параметров наблюдается при фрикционных свойствах материала (СВМПЭ, модифицированный фторопласт) со смазкой, полученных экспериментально. Наибольшие значения параметров наблюдаются у композиционного материала при табличном коэффициенте трения.

– Выявлено снижение площади контакта, связанное с расхождением контактных поверхностей: для СВМПЭ производства Германии при μ_3 – 2,55 % от первоначальной площади контакта; для композитного материала при μ_1 , μ_2 – на 2,18 %, μ_3 – 2,91 % от первоначальной площади контакта; для модифицированного фторопласта при μ_2 – на 1,45 %, μ_3 – 2,55 % от первоначальной площади контакта.

– Для каждой толщины прослойки происходит уменьшение контактных параметров при экспериментально полученным коэффициенте трения со смазкой, относительно табличного коэффициента трения.

– На относительно свободной от контакта поверхности S_{K_3} при наименьшем уровне контактного касательного напряжения возникает наибольший уровень контактного давления при полученных экспериментально фрикционных свойствах материала со смазкой.

– Выявлено, что при фрикционных свойствах полученных экспериментально относительно табличного коэффициента трения увеличилась площадь распределения максимальных значений интенсивности напряжений/пластических деформаций.

– Прослойки из композиционных материалов обладают наименьшим уровнем пластических деформаций и интенсивности напряжений. При этом по сравнению с другими материалами они испытывают больший уровень деформации при меньшем уровне напряжений.

Список литературы

1. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper (On the contact of elastic solids). - J. reine und angewandte Mathematik, 1882, 92, S. 156-171. [Английский перевод см.: Miscellaneous Papers by H. Hertz, eds. Jones and Schott. - London: Macmillan, 1896.]
2. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел [Текст] / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор ; Перевод с англ. Н. М. Михина и А. А. Силина ; Под ред. д-ра техн. наук И. В. Крагельского. - Москва : Машиностроение, 1968. - 543 с. : ил.; 22 см.
3. Крагельский И. В. Изд. 2-е перераб. И доп, М., изд-во «Машиностроение», 1968, 480 стр.
4. Зенкевич, О. К. Метод конечных элементов в технике : Пер. с англ. / О. Зенкевич; Под ред. Б. Е. Победри. - Москва : Мир, 1975. - 541 с. : ил.; 22 см. Пер. изд. Zienkiewicz, O. C. The finite element method in engineering science London, 1971
5. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 248 с.
6. Разработка алгоритма контактного взаимодействия на основе альтернирующего метода Шварца/Станкевич И.В., Яковлев М.Е., Си Ту Хтет// Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. - 2011. - №S1. - С. 134-141.
7. Решение задачи контактного взаимодействия с использованием h - адаптивного метода конечных элементов / Ящук Ю.А., Прокопышин И.И.//Сибирские электронные математические известия. - 2014. - Т. 11. - С. 220-228.
8. М. Б. Цетлин, А. А. Теплов, С. И. Белоусов, С. Н. Чвалун, Е. А. Головова, С. В. Крашенинников, Е. К. Голубев, М. Ю. Пресняков, А. С. Орехов, А. Л. Васильев Влияние квазикристаллического наполнителя на трибологические свойства композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. 2015 г.
9. Анализ деформационного поведения плоского слоя скольжения сферической опорной части, изготовленного из двух антифрикционных полимеров /Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. // Математическое моделирование в естественных науках. - 2019. - Т. 1. - С. 7-11.
10. Численный анализ влияния коэффициента трения на параметры зоны контакта сферической опорной части / Каменских А.А., Парахина Д.Д. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2017. - Т. 19, №1. - С. 122-138.
11. Идентификация математической модели поведения антифрикционных полимерных материалов / Адамов А.А., Носов Ю.О., Каменских А.А. // Научно-технический вестник Поволжья. - 2018. - № 12. - С. 49-51.
12. Разработка и исследование триботехнических композиционных материалов на основе вторичных полимеров / Терентьев В.В., Баусов А.М.,

- Крупин А.В., Орешков Е.Л. // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2014. – №4(27). – С. 76-81.
13. Композиционный антифрикционный полимерный материал/Данюшина Г.А., Дерлугян П.Д., Стрельников В.В., Шишка Н.В.//Инженерный вестник Дона. – 2017. – №1(44). – С. 6.
 14. Матричный материал для антифрикционного полимерного композита/Кохановский В.А., Больших И.В.// Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – №5. – С. 33-37.
 15. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для металлополимерных узлов трения/Машков Ю.К., Кропотин О.В., Чемисенко О.В.// Омский научный вестник. – 2014. – №3(133). – С. 64-66.
 16. Исследование свойств фрикционных полимерных композиционных материалов, армированных тканями/Янковец Ж.Н.// Ученые заметки ТОГУ. – 2019. – Т. 10.№2. – С. 435-439.
 17. Модификация антифрикционных полимерных композиционных материалов на различных масштабных уровнях/Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Рыбин В.В.// Вопросы материаловедения. – 2009. – №1(57). – С. 9-16.
 18. Модифицирование антифрикционных углепластиков на молекулярном и наноуровнях / Бахарева В.Е., Анисимов А.В., Рыбин В.В., Савёлов А.С.// Трение и износ. – 2010. – Т. 31. №3. – С. 259-269.
 19. Веретельник О.В., Ткачук Н.А., Белик С.Ю. Контактное взаимодействие поршня с гальвано-плазменной обработкой боковой поверхности со стенками цилиндра ДВС // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». Машиноведение и САПР. – 2012. – № 22. – С. 32–39.
 20. Rakowski W.A., Zimowski S. Polyesterimide composites as a sensor material for sliding bearings // Composites: Part B engineering. – 2006. – Vol. 37. – P. 81–88.
 21. Гидродинамический анализ подшипников скольжения. Ч. 1. Учет нецилиндричности рабочих поверхностей / М.В. Зернин, А.В. Мишин, Н.Н. Рыбкин, С.В. Шилько // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 5. – С. 584–595.
 22. Argatov I. A general solution of the axisymmetric contact problem for biphasic cartilage layers // Mechanics Research Communications. – 2011. – № 38. – P. 29–33.
 23. Тукашев Ж.Б., Адилханова Л.А. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия // Геология, география и глобальная энергия. – 2010. – № 2. – С. 163–166.
 24. Выбор и обоснование оптимальных технологических параметров нанесения антифрикционного полимерного композиционного материала/Корнеев А.А., Шилов Н.В.//Достижения вузовской науки. – 2013. – №2. – С. 93-97.
 25. Богданов Г.И., Ткаченко С.С., Шульман С.А. Опорные части мостов: учеб. пособие для студентов вузов / Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2006. – Ч. 1. – 32 с.
 26. Оценка износа конструкций деформационных швов и пути повышения их долговечности / Б.А. Бондарев, Т.М. Зайцева, А.Г. Саакян, Т.Р.

Лезгиев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10. №4. – С. 126-132.

27. Деформационные швы мостовых сооружений: зарубежный опыт физического моделирования / Ш.Н. Валиев, В.С. Смоленкин, Е.Б. Рыбникова // Транспортные сооружения. – 2016. – Т. 3. №2. – С. 6.

28. Элементы и системы отвода ливневых вод с проезжей части мостовых сооружений / Н.А. Новиков, Т.В. Артемьева // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – 1(44). – С. 98–106 .

29. Защита мостовых конструкций от атмосферной коррозии / А.Н. Никоноров, А.А. Зайцев // Проблемы науки. – 2020. – №1(49). – С. 12-15.

30. Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers / Huihui Dong, Xiuli Du, Qiang Han, Hong Hao, Kaiming Bi, Xiaoqiang Wang // Engineering Structures. – Vol. 148. – 2017. – P. 47-62.

31. On the effectiveness of principal component analysis for decoupling structural damage and environmental effects in bridge Structural. /Debarshi Sen, Kalil Erazo, Wei Zhang, Satish Nagarajaiah, Limin San. // Journal of Sound and Vibration. – 2019 – Vol. 457. – P. 280-298.

32. Semi-active vibration control of smart isolated highway bridge structures using replicator dynamics. /Mariantonieta Gutierrez Soto, Hojjat Adeli//Engineering Structural. – 2019. – Vol. 186. – P. 536-552.

33. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation. /Luna Ngeljaratan, Mohamed A. Mountain. //Engineering Structural. – 2020. – Vol. 213. – 110551.

34. Performance-based design of bridge structures under vehicle-induced fire accidents: Basic framework and a case study. /Rujin Ma, Chuanjie Cui, Minglei Ma, Airong Chen. //Engineering Structural. – 2019. – Volume 197. – 109390.

35. Study on the performance of energy absorption structure of bridge piers against vehicle collision. /Jin Pan, Han Fang, Ming Cai Xu, Ya Feng Wu. //Thin-Walled Structural. – 2018. – Vol. 130. – P. 85-100.

36. Экспериментально-теоретические исследования колебаний неразрезного процентного строения моста под действием подвижной нагрузки. /Аверин А.Н.//Строительная механика и конструкции. – 2019. – Т. 1. № 20. – С. 41-51.

37. Моделирование пространственных колебаний упругости оперного сталежелезобетонного процентного строения моста при подвижной нагрузке /Гриднев С.Ю. //Строительная механика и конструкции. – 2011. – Т. 1. №2. – С. 79-86.

38. Исследование аэроупругой устойчивости двух пролета строения в условиях взаимной интерференции. /Козичев А.В., Парышев С.Э., Стрелков - К.С., Шустикова А.А., Теперин Л.Л.//Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6. № 3. – С. 4.

39. Composite box girder with corrugated steel webs and trusses – A new type of bridge Structural. /Yiyan Chen, Jucan Dong, Tianhua Xu. //Engineering Structural. – 2018. – Vol. 166. – P. 354-362.
40. Исследование элементов мостовых конструкций методом голографической интерферометрии во встречных пучках / А.М. Попов, В.Б. Зиновьев, С.И. Герасимов, Л.А. Сподарева // Вестник томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – №6(65) – С. 210 – 219.
41. О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями / А.А. Пискунов, Т.А. Зиннуров, Д.В. Бережной, Б.Ш. Умаров, А.Р. Вольтер // Транспортные сооружения. – 2018. – Т.5, №2 – С. 2
42. Улучшение совместной работы балок мостов / Ю.А. Жигилий // Аллея науки. – 2018. – Т.2, №2(18) – С. 403 – 409.
43. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния элементов конструкции проезжей части мостовых сооружений с помощью окрестностных моделей / Б.А. Бондарев, И.А. Седых, А.М. Сметанникова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – №28. – С. 141-154.
44. Влияние неподвижных опорных частей на напряженное состояние пролетных строений при их несимметричном нагружении подвижной нагрузкой / П.П. Ефимов // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2012. – № 1(23) – С. 41–44.
45. Напряженно-деформированное состояние элементов мостовых конструкций с переменной толщиной стенок вдоль длины / В.А. Козлов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – №4 (48). – С. 71–82.
46. Новый способ усиления мостовых пролетных строений из композитных материалов / А.В. Макаров, С.В. Кульбин // Вестник волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2017. – № 48(67) – С. 140–149.
47. Основные проблемы отечественного мостостроения / И.Г. Овчинников, О.Н. Распоров, И.И. Овчинников // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – Т. 1. – С. 437–442.
48. Retrofitting of damaged reinforced concrete bridge structure / Muhammad Fawad, K. Kalman, R.A. Khushnood, Muhammad Usman, // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 18. – P. 189-197.
49. Structures with bridged cracks and weak interfaces/Mikhail Perelmuter//Procedia Structural Integrity. – 2018. – Vol. 13 – P. 793-798.
50. Wu, Yi., Wang, H., Li, Ai., Feng, D., Sha, B., Zhang, Yu. Explicit finite element analysis and experimental verification of a sliding lead rubber bearing // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. – 2017. – Vol. 18, № 5. – Pp. 363-376.

51. Критическая оценка российских и зарубежных временных вертикальных нормативных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения / П.М. Саламахин // *Sciences of Europe*. – 2019. - №45-1 (45) – С. 44 – 50.
52. Критическая оценка российских и зарубежных временных вертикальных нормативных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения, способ устранения выявленных их недостатков / П.М. Саламахин, И.В. Решетников // *Транспортные сооружения*. – 2019. – Т. 6, №3. – С. 8.
53. Численная модель предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутой арматурой при различных пролетах среза / П.В. Кривицкий, Н.В. Матвеев // *Вестник брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – №1 (109). – С. 92–97.
54. Evaluation of pile-soil-structure interaction effects on the seismic responses of a super long-span cable-stayed bridge in the transverse direction: A shaking table investigation. / Limin Sun, Wen Xie. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – 105755
55. Деформирующиеся плоские опорные части мостов / А.В. Макаров, А.В. Журавлев // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – №1(48). – С. 134.
56. Математическое моделирование колебаний пролетных строений мостов, установленных на резиновые опорные части, при подвижной нагрузке / С.Ю. Гриднев, И.В. Ханин // *Вестник гражданских инженеров*. – 2006. – №1(6). – С. 16-19.
57. Замена опорных частей мостового сооружения / Г.А. Целищев // *Дневник науки*. – 2019. – № 6 (30). – С. 37.
58. Опорная часть моста и её материал / Д.В. Фомин // *Научный журнал инженерные системы и сооружения*. – 2014. – №2 (15). – С. 80–90.
59. Исследование влияния смазочных канавок в антифрикционной прослойке на напряженное состояние контактного узла / А.А. Каменских, Н.А. Труфанов // *Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная математика и механика*. – 2012. – № 10. – С. 77–89.
60. Proske D. *Bridge Collapse Frequencies versus Failure Probabilities*. – Springer: 2018 – p. 129.
61. Кузнецова С.В., Козлов А.В. Причины аварий мостовых сооружений на территории РФ и стран СНГ // *Дороги и мосты*. – 2018. – № 1 (39). – С. 204-219.
62. Becker T.C., Mahin S.A. Correct treatment of rotation of sliding surfaces in a kinematic model of the triple friction pendulum bearing // *Earthquake Eng Struct Dynam*. – 2013. – Vol. 42, № 2. – Pp. 311-317.
63. Choi, E., Lee, J.S., Jeon, H.-Kw., Park, T., Kim, H.-T. Static and dynamic behavior of disk bearings for OSPG railway bridges under railway vehicle loading // *Nonlinear dynamic*. – 2010. – № 6. – Pp. 73-93.
64. Иванов Б.Г. Диагностика поврежденности пролетных строений металлических мостов. – М.: Манускрипт. – 2006. – 208 с

65. Каменских, А. А., & Труфанов, Н. А. (2013). Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала. Вычислительная механика сплошных сред, 6(1), 54-61.

66. Kamenskih A. A., Trufanov N. A. Regularities Interaction of Elements Contact Spherical Unit with the Antifrictional Polymeric Interlayer // Friction and Wear. – 2015. – Т. 36, № 2. – Pp. 170-176.

67. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. - Екатеринбург: УрО РАН, 2003. - 411 с.

68. Деформационное поведение современных антифрикционных полимерных материалов в элементах транспортно-логистических систем с учетом фрикционного контакта / А.А. Адамов, А.А. Каменских, Ю.О. Носов // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС2019) : [сб. науч. тр.], Алушта, Крым, 24-31 мая 2019 г. / Моск. авиац. ин-т (нац. исслед. ун-т), Рос. фонд фундам. исслед, Рос. акад. наук, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Рос. нац. ком. по теорет. и прикл. механике. - Москва : Изд-во МАИ, 2019. - С. 190-192