

DOI: 10.15593/2499-9873/2021.2.02

УДК 539.374

**А.А. Каменских, В.И. Струкова**

Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Россия

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СЛОЯ  
ИЗ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ  
УГЛУБЛЕНИЕМ ПОД СМАЗКУ**

Выполнено математическое моделирование деформационного поведения плоского слоя полимерного материала стальной полированной плитой в рамках фрикционного контакта. Рассмотрено влияние геометрической конфигурации технологического углубления под смазочный материал на деформирование контактного узла. Объем смазочного материала в расчетной схеме не учитывается, что соответствует неблагоприятному случаю отсутствия смазки в углублении. Выполнено создание параметризированной модели части полимерного слоя с одним технологическим углублением, отличающимся радиусом скругления основания от 0,5 до 2 мм, с шагом 0,25 мм. В рамках исследования установлено влияние геометрии технологического углубления на деформирование его профиля при нагрузках от 5 до 90 МПа. Установлены изменения площади сечения углубления, максимальный уровень интенсивности пластических деформаций, контактное давление, контактное касательное напряжение и площадь контактного взаимодействия от нагрузки и радиуса скругления. При нагрузках более 40–50 МПа происходит перераспределение параметров зоны контакта из-за увеличения площади контактного взаимодействия для всех вариантов скругления основания технологического углубления под смазочный материал. Конструкция с радиусом скругления 2 мм обладает рядом преимуществ: минимальное деформирование площади технологического углубления, минимальный уровень максимальной интенсивности пластических деформаций, максимальная площадь контактного взаимодействия и т.д.

**Ключевые слова:** полимер, физико-механические свойства, моделирование, численный эксперимент, трение, контакт, деформирование, технологическое углубление, геометрическая конфигурация, прослойка.

**A.A. Kamenskikh, V.I. Strukova**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **DEFORMATION BEHAVIOR MATHEMATICAL MODELING OF A POLYMER MATERIAL LAYER WITH TECHNOLOGICAL HOLE FOR A LUBRICANT**

Mathematical modeling of the flat layer of a polymeric material deformation behavior with a polished steel plate within the framework frictional contact was carried out of this work. The influence of the technological groove geometric configuration for the lubricant on the contact unit deformation is considered. The lubricant volume in the calculation scheme does not take into account that does not correspond to the favorable occasion of lack of lubrication in the recess. The parameterized model creation of a polymer layer portion with one technological recess with a different base rounding radius from 0.5 to 2 mm with a step of 0.25 mm is done. The technological recess geometrical influence on the deformation of its profile at loads from 5 to 90 MPa was established within the framework of the study. Changes in the cross-sectional area of the recess, the maximum level of the plastic deformations intensity, contact pressure, contact tangential stress and the contact interaction area from the load and the rounding radius are established. The contact zone parameters redistribution due to an increase in the contact interaction area for all rounding versions for the technological recess base for the lubricant occurs at loads of more than 40-50 MPa. The design with a rounding radius of 2 mm has a number of advantages: minimum deformation of the technological recess area, the minimum level of the maximum plastic deformations intensity, the maximum contact interaction area, etc.

**Keywords:** polymers, physical and mechanical properties, modeling, numerical experiment, friction, contact, deformation, technological hole, geometric configuration, interlayer.

### **Введение**

Полимерные материалы и композиты на их основе нашли широкое применение во многих отраслях промышленности и техники: авиации [1–3 и др.], строительстве [4, 5 и др.], мостостроении [4, 6, 7 и др.], недропользовании [8–10 и др.], медицине [11, 12 и др.] и т.д. Полимерные материалы относятся к функциональным материалам [13, 14] и часто обладают улучшенными физико-механическими, реологическими, фрикционными и эксплуатационными свойствами. Данные материалы часто применяются в качестве относительно тонких защитных и защитно-упрочняющих покрытий [15]. Современные проблемы недропользования неотрывно связаны с созданием и использованием современных полимерных и композиционных материалов в качестве защитных и защитно-упрочняющих покрытий и прослоек при решении ряда актуальных задач. Использование полимерных покрытий и прослоек направлено на решение ряда актуальных задач нефтегазовой отрасли: защиту поверхности металлических трубопроводов от действия агрес-

сивных сред посредством антикоррозионных покрытий [9, 10, 16, 17]; обеспечение долговечности металлоконструкций зданий и сооружений нефтегазового назначения, особенно в экстремальных условиях термодинамического нагружения, в том числе в северных регионах в условиях пониженных температур [18–20 и др.]; снижение влияния остаточных напряжений при усадке полимерных защитных покрытий; снижение гидравлического сопротивления; повышение когезионной и адгезионной прочности элементов конструкций нефтегазовой отрасли [21–22]; снижение трения между ответственными деталями и т.д. Можно также выделить ряд следующих актуальных задач нефтегазовой отрасли, связанных с влиянием механических и контактных нагрузок на элементы конструкций [21]: влияние толщины и деформационных характеристик защитного полимерного слоя на сопротивление покрытия разрушению при контактном нагружении; отслаивание полимерных покрытий и прослоек от металлических элементов конструкций; разрушение химических связей в полимерном материале при деформировании узлов трения нефтегазовой отрасли и т.д. Ряд исследований направлен на анализ влияния химических, адгезионных, физико-механических, реологических и других свойств современных полимерных материалов и композитов на деформационное поведение элементов конструкций нефтегазовой отрасли [23 и т.д.]. Отдельно можно отметить исследования, направленные на изучение влияния смазки [24] и температурно-силовых режимов работы [25] элементов нефтегазопроводов и других конструкций нефтегазовой отрасли на поведение полимерных и композиционных защитно-упрочняющих покрытий. Относительно тонкие полимерные покрытия и прослойки часто работают в рамках фрикционного контакта и могут включать технологические углубления разной геометрической конфигурации и назначения. При этом актуальны: исследование поведения полимерных покрытий при их сопряжении с металлическими и неметаллическими элементами конструкций, исследование влияния геометрической конфигурации конструктивных элементов, анализ влияния нагрузок и фрикционного контакта на деформирование полимерного слоя.

Данная работа направлена на исследование фрикционного контакта полимерного слоя с полированной стальной плитой в рамках модельной задачи, а также влияния геометрической конфигурации технологического углубления в полимерной прослойке на деформирование контактного узла в целом.

## 1. Постановка задачи

Исследуется влияние геометрической конфигурации технологического углубления под смазку на деформационное поведение плоского слоя полимерного материала, расчетная схема которого приведена на рис. 1. Задача рассматривается для неблагоприятного случая отсутствия объема смазки в углублении. Слой полимерного материала 2 деформируется полированной стальной плитой 1 с учетом фрикционного контакта по поверхности сопряжения и постоянного давления разного уровня. В рамках первого приближения задача реализована для части полимерного слоя с одним технологическим углублением.

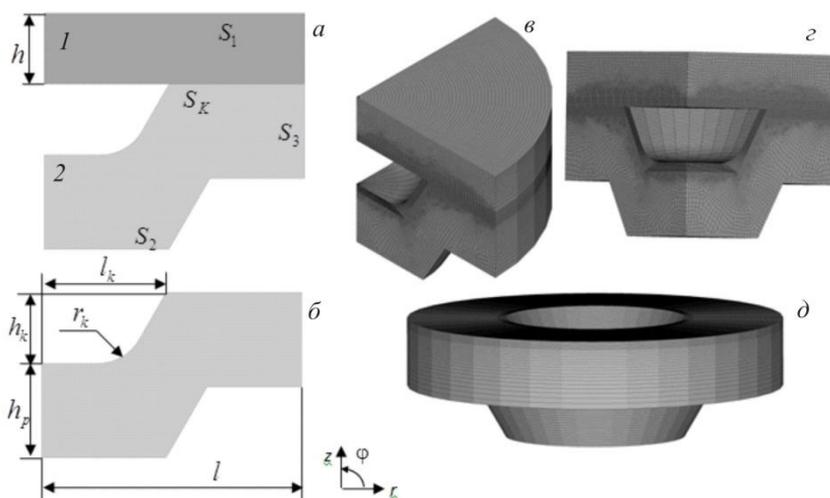


Рис. 1. Расчетная схема полимерного слоя с технологическим углублением: *a* – расчетная схема; *б* – полимерный слой с технологическим углублением; *в*, *г*, *д* – пространственная геометрия с конечно-элементной сеткой

Задача реализуется в осесимметричной постановке. Геометрическая конфигурация расчетной схемы: высота полимерного слоя  $h_p = 4$  мм, максимальная высота технологического углубления под смазочный материал  $h_k = 3$  мм, высота стальной плиты  $h = 3$  мм, длина контактного узла  $L = 2l = 22$  мм, радиуса скругления технологического углубления  $r_k$  варьируется от 0,5 до 2 мм, с шагом 0,25 мм, длина тех-

нологического углубления до деформирования  $L_k = 2l_k = 10,5$  мм. Рассматривается неблагоприятный случай отсутствия объема смазки в технологическом углублении.

Математическая постановка задачи приведена в источнике [26] и дополняется учетом больших деформаций в объеме полимерного материала. В качестве материала плоского полимерного слоя рассматривается модифицированный фторопласт [27]. К жесткой стальной плите на поверхности  $S_1$  прикладывается постоянное давление от 5 до 90 МПа. На поверхностях  $S_2$  и  $S_3$  запрещены вертикальные и горизонтальные перемещения соответственно. На границе  $S_k$  моделируется фрикционное контактное взаимодействие с заранее неизвестной площадкой контакта и всеми типами контактных состояний, коэффициент трения пары материалов «сталь – полимер» считается равным 0,04. Исследование выполнено с использованием метода конечных элементов в прикладном программном пакете ANSYS. В рамках моделирования реализована конечно-элементная сетка с градиентным сгущением элементов к области сопряжения материалов, характерные размеры элементов расчетной схемы выбраны согласно ранее реализованному исследованию [26].

## 2. Анализ результатов исследования

В рамках работы выполнена серия численных экспериментов о деформировании части полимерного слоя с технологическим углублением под смазочный материал разной геометрической конфигурации. Объект исследования деформируется жесткой стальной полированной плитой давлением от 5 до 90 МПа. При нагрузках от 5 до 30 МПа деформирование профиля технологического углубления незначительное (менее 10 %) и имеет малые отличия при разных радиусах скругления. При нагрузках от 40 до 90 МПа объем технологического углубления под смазочный материал уменьшается значительно, что связано с пластическими деформациями модифицированного фторопласта. Рассмотрим в сравнении деформирование профиля технологического углубления при максимальной нагрузке 90 МПа, действующей на стальную плиту (рис. 2).

Деформирование профиля технологического углубления при максимальном давлении 90 МПа представлено на части контактной поверхности вблизи углубления. Можно отметить, что при увеличении

$r_k$  от 0,5 до 2 мм наблюдается уменьшение деформирования профиля углубления под смазочный материал. При  $r_k = 0,5$  мм наблюдается максимальное деформирование профиля углубления под смазку 93,6 %, при  $r_k = 2,0$  мм минимальное – 82,6 %.

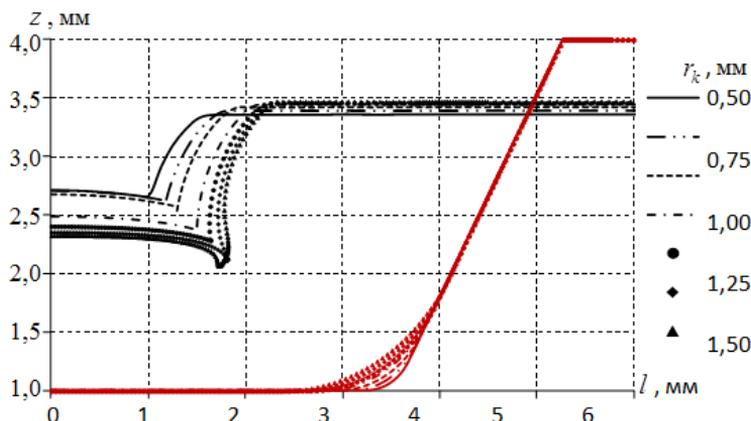


Рис. 2. Деформирование профиля углубления при 90 МПа:  
красная линия – недеформированная геометрия;  
черная линия – геометрия после деформирования

При деформировании изменяется площадь сечения технологического углубления, так как объем смазочного материала в расчетной схеме не учитывается (неблагоприятный случай). Рассмотрим снижение площади сечения углубления под смазочный материал (%) для всех вариантов  $r_k$  по формуле

$$\Delta S = 100 - \frac{S_{\text{hole}} - \tilde{S}_{\text{hole}}}{S_{\text{hole}}} \cdot 100,$$

где  $S_{\text{hole}}$  – площадь недеформированного сечения углубления под смазочный материал;  $\tilde{S}_{\text{hole}}$  – площадь сечения углубления под смазочный материал после деформирования. Зависимость  $\Delta S$  от действующего на контактный узел давления представлена на рис. 3.

Наблюдается нелинейная зависимость площади сечения углубления под смазочный материал от нагрузки.  $\Delta S$  менее 10 % наблюдается

при нагрузках до 30 МПа. Влияние радиуса скругления технологического углубления под смазочный материал на  $\Delta S$  незначительное при нагрузках 60 МПа и менее.  $\Delta S \sim 40\%$  при нагрузке 60 МПа.

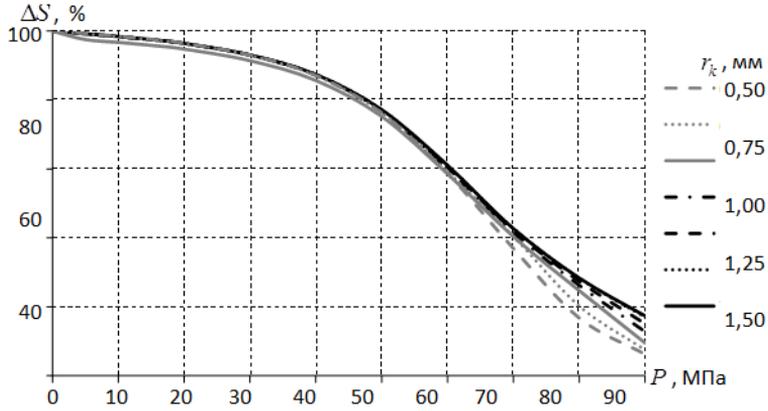


Рис. 3. Изменение площади сечения углубления в зависимости от нагрузки

При значениях давления более 60 МПа можно отметить увеличение влияния радиуса скругления технологического углубления на деформирование его профиля. При 90 МПа максимальное деформирование площади профиля углубления под смазку наблюдается при  $r_k = 0,5$  мм –  $\Delta S = 6,37\%$  от первоначальной площади сечения, минимальное при  $r_k = 2$  мм –  $\Delta S = 17,4\%$ . Рассмотрим зависимость  $\Delta S$  от радиуса скругления основания технологического углубления при максимальной нагрузке 90 МПа (рис. 4).

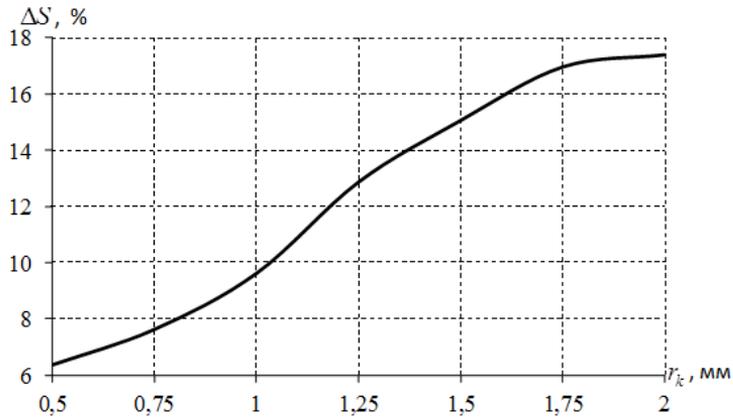


Рис. 4. Зависимость  $\Delta S$  от радиуса скругления углубления при 90 МПа

Наблюдается нелинейное увеличение  $\Delta S$  при увеличении радиуса скругления технологического углубления.  $\Delta S$  при максимальной нагрузке 90 МПа при  $r_k = 2$  мм в 2,73 раза больше, чем при  $r_k = 0,5$  мм. Деформирование профиля углубления под смазочный материал связано с пластическим течением модифицированного фторопласта и уровнем интенсивности пластических деформаций. Максимальный уровень пластических деформаций наблюдается вблизи скругления технологического углубления. Уровень интенсивности пластических деформаций при максимальной нагрузке значительно превышает 100 %. При этом в математической постановке учтена возможность появления больших деформаций в материале полимерного слоя. Максимальный уровень интенсивности пластических деформаций менее 20 % наблюдается при нагрузках  $< 30$  МПа, при нагрузках  $\geq 30$  МПа  $\max \varepsilon_{II_p}$  возрастает значительно. При нагрузках  $\leq 50$  МПа  $\max \varepsilon_{II_p}$  при разных радиусах скругления отличается незначительно, при 50 МПа максимальный уровень интенсивности пластических деформаций равен  $\sim 100$  % для всех рассмотренных вариантов  $r_k$ . При нагрузках более 50 МПа наблюдаются значительные отличия максимального уровня интенсивности пластических деформаций при разных радиусах скругления канавки. Хорошо прослеживается снижение максимального уровня пластических деформаций при увеличении радиуса скругления. Минимальный уровень  $\max \varepsilon_{II_p}$  при 90 МПа наблюдается при радиусе скругления технологического углубления под смазочный материал 2 мм и составляет  $\sim 225$  %.

Особый интерес представляют данные, полученные на поверхности сопряжения материалов «сталь – полимер» (поверхность фрикционного контакта). Характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения имеет малые отличия: в области первоначального контакта параметры плавно возрастают с максимумом вблизи правой границы расчетной схемы; вблизи  $l_k$  наблюдается скачок контактных параметров в случае увеличения площади контактного взаимодействия из-за деформирования технологического углубления. Большая площадь поверхности сопряжения находится в состоянии «проскальзывание с трением».

На рис. 5 представлена зависимость максимального уровня параметров контакта от нагрузки для всех рассмотренных вариантов радиуса скругления технологического углубления под смазочный материал.

Отметим, что зависимость максимального уровня контактных параметров от нагрузки нелинейная. Наблюдается рост параметров до нагрузок 40–50 МПа, при нагрузках 40–60 МПа наблюдается незначительное снижение максимального уровня параметров, что может быть связано с увеличением площади контакта.

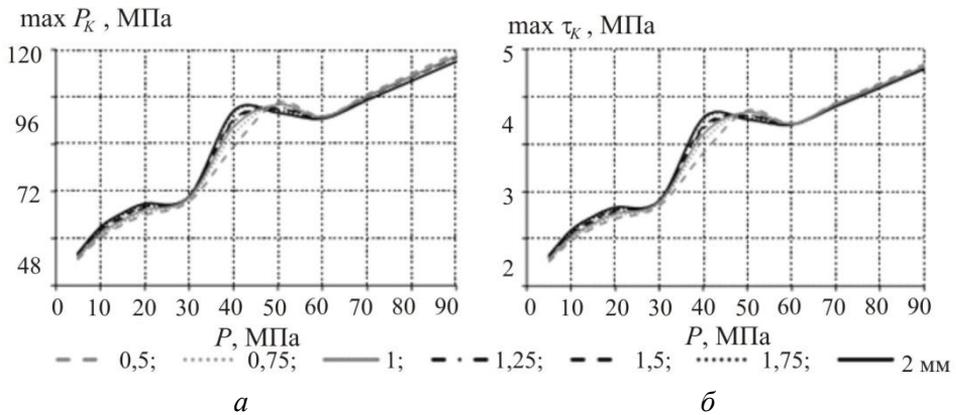


Рис. 5. Зависимость максимального уровня контактных параметров от  $P$ :  
 а – контактное давление; б – контактное касательное напряжение

Рассмотрим изменение площади контакта от нагрузки (рис. 6).

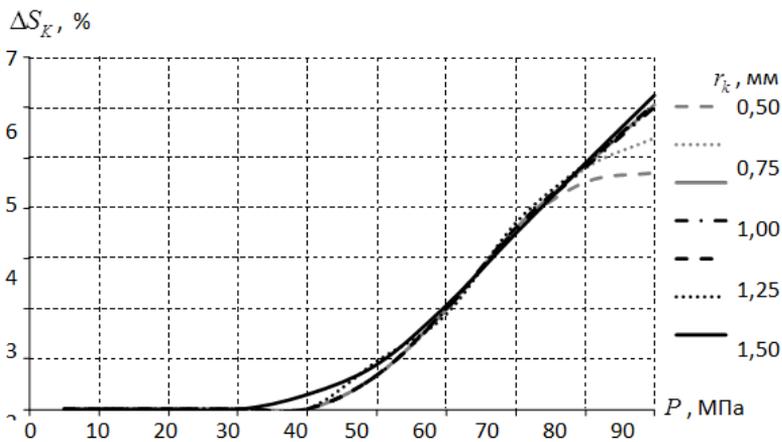


Рис. 6. Изменение площади контактной поверхности

Увеличение площади контакта после деформирования (%) вычисляется для каждого расчетного случая по формуле

$$\Delta S_K = \frac{|S_{\text{конт}} - \tilde{S}_{\text{конт}}|}{S_{\text{конт}}} \cdot 100,$$

где  $S_{\text{конт}}$  – первоначальная площадь контакта;  $\tilde{S}_{\text{конт}}$  – площадь контакта после деформирования.

Увеличение площади контактного взаимодействия при разных радиусах скругления технологического углубления наблюдается при 40–50 МПа: 40 МПа при  $r_k = 0,5$  мм; 50 МПа при  $r_k = 0,75 \div 2$  мм. При нагрузках более 50 МПа площадь контактного взаимодействия увеличивается плавно и обладает малыми отличиями у конструкций с разными радиусами скругления технологического углубления до 80 МПа. Значительные отличия площади контактного взаимодействия при разной геометрической конфигурации углублений под смазочный материал наблюдаются при максимальной нагрузке 90 МПа (рис. 7).

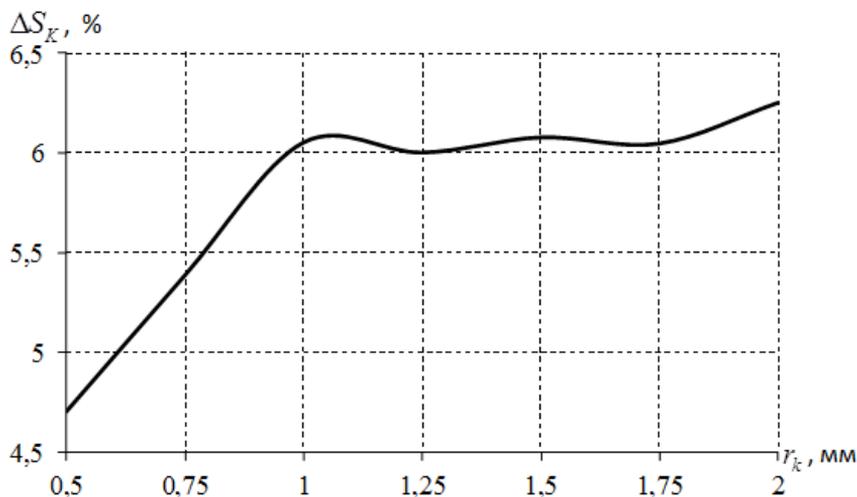


Рис. 7. Зависимость  $\Delta S_K$  от  $r_k$  при 90 МПа

Наименьшее увеличение площади контакта наблюдается при радиусе скругления 0,5 мм и составляет 4,7 % от первоначальной площади контакта при нагрузке 90 МПа. При  $r_k = 1 \div 2$  мм наблюдаются малые различия в итоговой площади контактного взаимодействия,

площадь контактного взаимодействия увеличилась на 6 % и более. Максимальное увеличение площади контакта наблюдается при  $r_k = 2$  мм и составляет 6,25 %.

### Заключение

Рассмотрено влияние геометрической конфигурации технологического углубления и уровня нагрузки на напряженно-деформированное состояние полимерной прослойки при контакте с полированной стальной плитой. Деформирование контактного узла рассмотрено для неблагоприятного случая: без учета объема материала смазки в технологическом углублении. В рамках численного моделирования получен ряд качественных и количественных закономерностей деформационного поведения контактного узла.

Рассмотрено семь вариантов геометрической конфигурации технологического углубления под смазочный материал: скругление основания от 0,5 до 2 мм. Установлено влияние геометрической конфигурации технологического углубления на деформационное поведение модельной задачи:

- геометрическая конфигурация технологического углубления оказывает малое влияние на контактное давление и контактное касательное напряжение;

- увеличение площади контактного взаимодействия при радиусе скругления 0,5 мм начинается при 40 МПа, у остальных радиусов скругления – только при 50 МПа;

- при нагрузках более 80 МПа отмечено значительное влияние радиуса скругления основания технологического углубления на площадь контактного взаимодействия, при  $r_k = 2$  мм площадка контакта на 1,5 % больше, чем при  $r_k = 0,5$  мм;

- можно отметить значительное влияние радиуса скругления при нагрузках более 50 МПа на площадь поперечного сечения углубления после деформирования, уровень и характер распределения интенсивности пластических деформаций;

- конструкция с  $r_k = 2$  мм обладает наибольшей площадью поперечного сечения технологического углубления при максимальных

уровнях нагрузки и минимальным значением уровня пластических деформаций вблизи скругления.

Установлено влияние уровня нагрузки на деформационное поведение модельной задачи:

- при нагрузках до 50 МПа наблюдается незначительное деформирование полимерной прослойки с технологическим углублением (площадь контактного взаимодействия не изменяется, нет перераспределения контактного давления и контактного касательного напряжения, уровень интенсивности пластических деформаций не превышает 100 %, уменьшение площади поперечного сечения менее 25 %);
- при нагрузках более 50 МПа наблюдается более существенное деформирование полимерного слоя, и при 90 МПа остаточная площадь поперечного сечения технологического углубления достигает 6,37–17,4 % от первоначальной площади сечения, при увеличении площадки контакта максимум на 6,24 % и минимальном уровне пластических деформаций более 200 %.

### **Благодарность**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.*

### **Список литературы**

1. Rudzei G.F., Kalyuta A.A. On the possibility of predicting the fatigue life of structural elements made of aviation composite materials and alloys // Russian Metallurgy (Metally). – 2020. – Iss. 4. – P. 470–476.
2. Dubinskii S.V., Zichenkov M.C., Zharenov I.A. Safety provision for composite structures in aviation: today and tomorrow // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2020. – Vol. 49. – P. 920–931.
3. Processability of polymeric composites / eds by A.K. Ghosh, M. Dwivedi. – New Delhi: Springer, 2020. – 270 p.
4. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Б.Б. Мандрик-Котов, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение: интернет-журнал. – 2016. – Т. 8, № 6(37). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (дата обращения: 21.05.2021).
5. Тишков Н.Л., Коблова Я.В. Обзор применения пултрузионных профилей из полимерных композитов в качестве несущих элементов // Дальний

Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 96–98.

6. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities interaction of elements contact spherical unit with the antifrictional polymeric interlayer // *Journal of Friction and Wear*. – 2015. – Vol. 36, no. 2. – P. 170–176.

7. Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2020. – № 4. – С. 15–26. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.02

8. Design of filament-wound composite elbows based on non-geodesic trajectories / B. Zhang, H. Xu, L. Zu, D. Li, B. Zi, B. Zhang // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 189. – P. 635–640.

9. Халиков Р.М., Свирский С.Э. Эффективные полимерные антикоррозионные покрытия стальных трубопроводов в нефтегазовой отрасли // *NovaInfo.Ru*. – 2019. – № 106. – С. 30–31.

10. Сусоров И.А., Чалов И.В., Хаджаева С.Г. Антикоррозионное полимочевинуретановое покрытие для изоляции труб, запорной арматуры и фланцевых соединительных деталей трубопроводов для нефтегазовых сред // *Пластические массы*. – 2013. – № 6. – С. 50–54.

11. Математическое моделирование биомеханического поведения базиса съемного зубного протеза под действием характерных жевательных нагрузок / С.Д. Арутюнов, Д.И. Грачев, Г.Г. Багдасарян, В.Н. Никитин, Н.В. Максимова, А.Д. Никитин // *Российский журнал биомеханики*. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 491–504.

12. Биоразлагаемые полимерные материалы для медицины: от импланта к органу / В.И. Гомзьяк, В.А. Демина, Е.В. Разуваева, Н.Г. Седуш, С.Н. Чвалун // *Тонкие химические технологии*. – 2017. – Т. 12, № 5. – С. 5–20.

13. Polymer synthesis: theory and practice fundamentals, methods, experiments / D. Braun, H. Cherdron, M. Rehahn, H. Ritter, B. Voit. – Berlin: Springer, 2013. – 404 p.

14. Bergbreiter D.E., Martin C.R. Functional polymers. – Boston: Springer, 1989. – 224 p.

15. Industrial applications for intelligent polymers and coatings / eds by M. Hosseini, A. Makhlouf. – Cham: Springer, 2016. – 710 p.

16. Отечественные материалы для заводской полиэтиленовой изоляции стальных труб / А.А. Иоффе, С.Г. Низьев, А.И. Екимов, Е.В. Калугина, М.Л. Кацевман // *Полимерные трубы*. – 2015. – № 2 (48). – С. 52–54.

17. Медведева М.Л., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: учеб. пособие для вузов нефтегазового профиля / РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина – М., 2013. – 250 с.

18. Протасов В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли. – М.: Недра, 2007. – 373 с.

19. К вопросу о применении полимерных теплоизоляционных покрытий для насосно-компрессорных труб на месторождениях приобской низменности / В.И. Дарищев, С.Н. Лысенков, С.А. Галактионов, Ю.В. Краснов, О.И. Булаткин // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 5–6. – С. 30–34.

20. Мелехина Т.А. Повышение качества стальных промысловых трубопроводов на нефтяных месторождениях [Электронный ресурс] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2017. – № 5 (39). – URL: [http://iea.gosinfo.ru/files/2017\\_05/2017\\_05\\_05.pdf](http://iea.gosinfo.ru/files/2017_05/2017_05_05.pdf) (дата обращения: 21.05.2021).

21. Протасов В.Н. Сопrotивление полимерных покрытий разрушению при действии контактных нагрузок // Территория Нефтегаз. – 2007. – № 2. – С. 22–25.

22. Теоретические и прикладные аспекты технологии разработки состава адгезионного слоя / М.К. Жантасов, А.К. Орынбасаров, Д. Камалов, А.Ж. Зият // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. – 2017. – № 1 (40). – С. 31–34.

23. Экспериментальная оценка адгезионных свойств внутреннего гладкостного покрытия трубопроводов к асфальто-смоло-парафинистым отложениям нефтей Ярегского месторождения / А.В. Сальников, Т.Ш. Салаватов, З.Х. Ягубов, Г.Р. Мустафаева // Научные труды НИПИ НЕФТЕГАЗ ГНКАР. – 2020. – № 1. – С. 51–58.

24. Плескунов И.В., Сырков А.Г., Виноградова А.А. Применение достижений нанотрибологии и наноструктурной пассивации поверхности для контроля свойств смазки и защиты металлического оборудования горнохимических предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 2. – С. 86–98.

25. К вопросу определения температурного режима трубопроводов системы нефтесбора / И.А. Гуськова, Д.Р. Хаярова, Е.В. Леванова, И.Е. Белошапка // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 4. – С. 445–453.

26. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Deformation behavior numerical analysis of the flat sliding layer of the spherical bearing with the lubrication hole // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2020. – Vol. 78. – P. 314–325.

27. Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. – С. 43–56.

## References

1. Rudzei G.F., Kalyuta A.A. On the Possibility of Predicting the Fatigue Life of Structural Elements Made of Aviation Composite Materials and Alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, iss. 4, pp. 470-476.
2. Dubinskii S.V., Zichenkov M.C., Zharenov I.A. Safety Provision for Composite Structures in Aviation: Today and Tomorrow. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, pp. 920-931.
3. Processability of Polymeric Composites: in editors Ghosh A.K., Dwivedi M., New Delhi: Springer, 2020. 270 p.
4. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Mandrik-Kotov B.B., Mikhaldykin E.S. Problemy primeneniya polimernyh kompozicionnyh materialov v transportnom stroitel'stve [Problems of application of polymeric composite materials in transport construction]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Online Journal of Science]. 2016, vol. 8, no. 6(37), available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (accessed 21 May 2021).
5. Tishkov N.L., Koblova Ja.V. Obzor primeneniya pultruzionnyh profilej iz polimernyh kompozitov v kachestve nesushhih jelementov [Overview of the application of pultruded profiles from polymer composites as carrying elements]. *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* [Far East: problems of development of the architectural and construction complex]. 2020, vol. 1, no. 1, pp. 96-98.
6. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities interaction of elements contact spherical unit with the antifrictional polymeric interlayer. *Journal of Friction and Wear*. 2015, vol. 36, no. 2, pp. 170-176.
7. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Chislenniye analiz geometricheskoi konfiguratsii sfericheskoi opornoj chasti s antifriktsionnoi prosloikoi iz raznykh materialov [Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2020, no. 4, pp. 15-26.
8. Zhang B., Xu H., Zu L., Li D., Zi B., Zhang B. Design of filament-wound composite elbows based on non-geodesic trajectories. *Composite Structures*. 2018, vol. 189, pp. 635-640.
9. Khalikov R.M., Svirskiy S.Je. Jeffektivnye polimernye antikorrozionnye pokrytija stal'nyh truboprovodov v neftegazovoj otrasli [Effective polymer anticorrosive coatings of steel pipelines in the petroleum and gas industry]. *NovaInfo.Ru*. 2019, no. 106, pp. 30-31.
10. Susorov I.A., Chalov I.V., Hadzhaeva S.G. Antikorrozionnoe polimochevinuretanovoe pokrytie dlja izoljatsii trub, zapornoj armatury i fasonnyh soedinitel'nyh detalej truboprovodov dlja neftegazovyh sred [Anti-corrosion polyurea-urethane coating for insulation of pipes, valves and fittings for oil and gas pipelines]. *Plasticheskie massy*, 2013, no. 6, pp. 50-54.

11. Arutyunov S.D., Grachev D.I., Bagdasaryan G.G., Nikitin V.N., Maksimova N.V., Nikitin A.D. Mathematical modelling of biomechanical behaviour of the removable dental prosthesis basis under the characteristic chewing loads. *Russian Journal of Biomechanics*. 2020, vol. 24, no. 4, pp. 420-431.

12. Gomzyak V.I., Demina V.A., Razuvaeva E.V., Sedush N.G., Chvalun S.N. Biorazlagaemye polimernye materialy dlja mediciny: ot implanta k organu [Biodegradable polymer materials for medical applications: from implants to organs]. *Fine Chemical Technologies*, 2017, vol. 12, no. 5, pp. 5-20.

13. Braun D., Cherdron H., Rehahn M., Ritter H., Voit B. Polymer synthesis: theory and practice fundamentals, methods, experiments. Berlin: Springer, 2013. 404 p.

14. Bergbreiter D.E., Martin C.R. Functional Polymers. Boston: Springer, 1989. 224 p.

15. Industrial applications for intelligent polymers and coatings: in editors Hosseini M., Makhlof A. Cham: Springer, 2016. 710 p.

16. Ioffe A.A., Niz'ev S.G., Ekimov A.I., Kalugina E.V., Kacevman M.L. Otechestvennyye materialy dlja zavodskoj polijetilenovoj izoljicii stal'nyh trub [Domestic materials for factory polyethylene insulation of steel pipes]. *Polimernye truby*, 2015, no. 2(48), pp. 52-54.

17. Medvedeva M.L., Muradov A.V., Prygaev A.K. Korrozija i zashhita magistral'nyh truboprovodov i rezervuarov: uchebnoe posobie dlja vuzov neftegazovogo profilja [Corrosion and protection of main pipelines and tanks: a textbook for oil and gas universities]. Moscow: Izdatel'skij centr RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2013. 250 p.

18. Protasov V.N. Teorija i praktika primenenija polimernyh pokrytij v oborudovanii i sooruzhenijah neftegazovoj otrasli [Theory and practice of using polymer coatings in equipment and structures of the oil and gas industry]. Moscow: Nedra, 2007. 373 p.

19. Darischev V.I., Lysenkov S.N., Galaktionov S.A., Krasnov Ju.V., Bulatkin O.I. K voprosu o primenenii polimernyh teploizoljacionnyh pokrytij dlja nasosno-kompressornyh trub na mestorozhdenijah priobskoj nizmennosti [On the issue of the use of polymer heat-insulating coatings for tubing in the fields of the priobskaya lowland]. *Territorija "Neftegaz"* [Oil and Gas Territory], 2020, no. 5-6, pp. 30-34.

20. Melekhina T.A. Povyshenie kachestva stal'nyh promyslovyh truboprovodov na neftjanyh mestorozhdenijah [Improving the quality of steel pipelines in oil fields]. *Informacionno-jekonomicheskie aspekty standartizacii i tehničeskogo regulirovanija*. 2017, no. 5(39), available at: [http://iea.gosinfo.ru/files/2017\\_05/2017\\_05\\_05.pdf](http://iea.gosinfo.ru/files/2017_05/2017_05_05.pdf) (accessed 21 May 2021).

21. Protasov V.N. Soprotivlenie polimernyh pokrytij razrusheniju pri dejstvii kontaktnyh nagruzok [Resistance of polymer coatings to fracture under the action of contact loads]. *Territorija "Neftegaz"* [Oil and Gas Territory]. 2007, no. 2, pp. 22-25.

22. Zhantasov M.K., Orynbasarov A.K., Kamalov D., Zijat A.Zh. Teoreticheskie i prikladnye aspekty tehnologii razrabotki sostava adgezionnogo sloja [Theoretical and applied aspects of the technology for developing the composition of the adhesive layer]. *Nauchnye trudy JuKGU im. M. Auezova* [Scientific works of SKU them. M. Auezova]. 2017, no. 1 (40), pp. 31-34.

23. Salnikov A.V., Salavatov T.Sh., Yagubov Z.H., Mustafaeva G.R. Jeksperimental'naja ocenka adgezionnyh svojstv vnutrennego gladkostnogo pokrytija truboprovodov k asfal'to-smolo-parafinistym otlozhenijam neftej Jaregskogo mestorozhdenija [Experimental evaluation of the adhesion properties of the internal smoothness coating of pipelines to the asphalt-and-oil-paraffin deposits of oil from the Yarega field]. *SOCAR Proceedings*. 2020, no. 1, pp. 51-58.

24. Pleskunov I.V., Syrkov A.G., Vinogradova A.A. Primenenie dostizhenij nanotribologii i nanostrukturnoj passivacii poverhnosti dlja kontrolja svojstv smazki i zashhity metallicheskogo oborudovanija gornohimicheskikh predpriyatij [The use of achievements of nanotribology and nanostructured surface passivation for control of lubricant properties and protection of metallic equipment of mining-chemical industries]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016, no. 2, pp. 86-98.

25. Guskova I.A., Khayarova D.R., Levanova E.V., Beloshapka I.E. K voprosu opredelenija temperaturnogo rezhima truboprovodov sistemy neftesbora [On determining temperature conditions of pipelines in oil-gathering system]. *Vestnik RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017, vol. 18, no. 4, pp. 445-453.

26. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Deformation behavior numerical analysis of the flat sliding layer of the spherical bearing with the lubrication hole. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2020, vol. 78, pp. 314-325.

27. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Matematicheskoe modelirovanie povedenija sovremennyh antifrikcionnyh polimerov [Mathematical modeling of modern antifriction polymers behavior]. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2019, no. 4, pp. 43-56.

Статья получена: 24.05.2021

Статья принята: 15.06.2021

### Сведения об авторах

**Каменских Анна Александровна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anna\_kamenskikh@mail.ru).

**Струкова Вероника Ивановна** (Пермь, Россия) – студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ura.4132@yandex.ru).

### **About the authors**

**Anna A. Kamenskih** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: anna\_kamenskih@mail.ru).

**Veronica I. Strukova** (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: ura.4132@yandex.ru).

### **Библиографическое описание статьи согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018:**

**Каменских, А.А.** Математическое моделирование деформационного поведения слоя из полимерного материала с технологическим углублением под смазку / А.А. Каменских, В.И. Струкова. – текст: непосредственный. – DOI: 10.15593/2499-9873/2021.2.02 // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – № 2. – С. 23–40.

### **Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:**

Каменских А.А., Струкова В.И. Математическое моделирование деформационного поведения слоя из полимерного материала с технологическим углублением под смазку // Прикладная математика и вопросы управления. – 2021. – № 2. – С. 23–40. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.2.02

### **Цитирование статьи в references и международных изданиях**

#### **Cite this article as:**

Kamenskikh A.A., Strukova V.I. Deformation behavior mathematical modeling of a polymer material layer with technological hole for a lubricant. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2021, no. 2, pp. 23–40. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.2.02 (in Russian)