

ВЫЯВЛЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ПОВЕРХНОСТИ ШТОКА ГИДРОЦИЛИНДРА ПРИ КОНТАКТЕ С УПЛОТНЕНИЕМ

Севагин С.В., Соловых Д.Я., Мнацаканян В.У.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

Ключевые слова: погрузочно-доставочная машина, гидроцилиндр, отказы, шток, уплотнение, качество поверхности, микропрофиль, отделка, алмазное выглаживание.

Аннотация. Выявлена необходимость решения задачи обеспечения требуемого микропрофиля поверхности штока гидроцилиндра, находящегося в контакте с уплотнением. Показано, что эффективным методом решения данного вопроса является правильный выбор отделочной обработки поверхности штока. Представлены результаты исследования различных форм микропрофилей поверхностей и выявлены наиболее благоприятные для эффективной работы контактной пары «шток-уплотнение». С этой целью в работе построены и исследованы контактные модели, описывающие внедрение жесткого единичного выступа шероховатости поверхности штока с различной формой микропрофиля (после полирования и алмазного выглаживания) в вязкоупругое полупространство с учетом реологических характеристик материала уплотнения. Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния материала уплотнения, проанализировано распределение напряжений под поверхностью цилиндра и показана топография поверхности хромированного штока, полученного после алмазного выглаживания.

IDENTIFICATION AND PROVISION OF REQUIREMENTS FOR THE QUALITY OF THE SURFACE OF THE HYDRAULIC CYLINDER ROD IN CONTACT WITH THE SEAL

Sevagin S.V., Solovykh D.Ya., Mnatsakanyan V.U.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow

Keywords: underground loader, hydraulic cylinder, failures, rod, seal, surface quality, micro profile, finishing, diamond smoothing.

Abstract. The necessity of solving the problem of providing the required microprofile of the surface of the hydraulic cylinder rod in contact with the seal is revealed. It is shown that an effective method of solving this issue is the correct choice of finishing treatment of the stem surface. The results of the study of various forms of microprofiles of surfaces are presented and the most favorable for the effective operation of the "rod-seal" contact pair are identified. For this purpose, contact models describing the introduction of a rigid single protrusion of the roughness of the stem surface with a different shape of the microprofile (after polishing and diamond smoothing) into a viscoelastic half-space, considering the rheological characteristics of the sealing material, are constructed, and investigated. A study of the stress-strain state of the sealing material was performed, the stress distribution under the cylinder surface was analyzed and the topography of the surface of the chrome rod obtained after diamond smoothing was shown.

Введение

Опыт эксплуатации погрузочно-доставочных машин (ПДМ) на Воркутинских шахтах показал, что количество отказов гидроцилиндров составляет 40...50% отказов машин ПДМ, применяемых на предприятии. Это подтверждается объемом закупок ООО «Воркутауголь» запасных частей для гидроцилиндров [1]. На рисунке 1 представлено количество отказов гидроцилиндров за 2019-2021 гг.

Основная причина выхода из строя гидроцилиндров – нарушение герметизации полостей вследствие интенсивного износа уплотнений.

Известно, что существует прямая зависимость между качеством сопрягаемой поверхности штока и эксплуатационными характеристиками и сроком службы уплотнения: чем лучше отделка, тем дольше прослужит уплотнение [2]. Фактически, должная отделочная обработка поверхности может обеспечить конкурентное преимущество по долговечности и эксплуатационным характеристикам уплотнения.

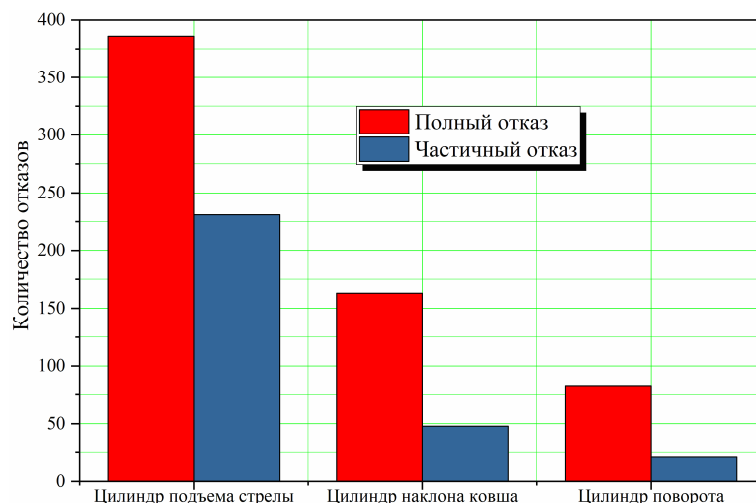


Рис. 1. Количество отказов гидродо цилиндров ПДМ различных моделей

Практика показывает, что износ сопрягаемых поверхностей штоков и уплотнений происходит вследствие протекания двух последовательных процессов: 1 – появления в зоне контакта частиц металла и неметаллических субстратов, отделившихся по причине усталостно-механического износа микрогребешков профиля поверхности штока и уплотнения; 2 – попадания посторонних абразивных частиц в зону контакта штока с уплотнением, что приводит к шаржированию поверхности штока, увеличению в соединении начальных зазоров и неблагоприятным последствиям – нарушению герметизации узла. Таким образом, становится очевидным прямое влияние микропрофиля поверхности штока на ресурс соединения.

Постановка задачи

На рисунке 2 смоделирована функциональная схема работы пары «шток-уплотнение», из которой видно, что герметичность полости цилиндра обеспечивается благодаря плотному прилеганию (контакту) уплотнения к поверхности штока, благодаря проявлениям упругих свойств материала уплотнения и обеспечению в соединении требуемого начального зазора. При относительном поступательном движении контактируемых поверхностей микровыступы штока, внедряясь в уплотнение, замыкают микроскопические полости между впадинами микропрофиля и уплотнением, тем самым, удерживая в них микрообъемы смазочного материала и обеспечивая требуемые условия относительного скольжения деталей. Из рисунка видно, что микрорельеф поверхности штока играет ключевую роль в обеспечении износостойкости соединения. В частности, наряду с указанным на рабочем чертеже штока параметром шероховатости Ra чрезвычайно важное значение для данного соединения приобретает форма микровыступов и регулярность микропрофиля поверхности штока [3].

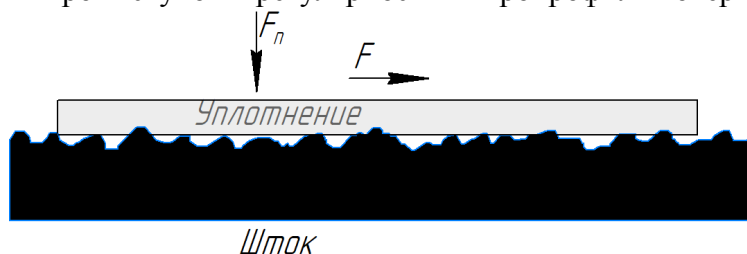


Рис. 2. Моделирование контакта уплотнения с поверхностью штока

Различные формы микропрофиля поверхностей, рекомендуемые для пар трения скольжения, показаны в таблице 1, где представлены три профиля, каждый из которых имеет почти одинаковые показатели параметра шероховатости Ra . Разница трибологических характеристик данных поверхностей становится очевидной, когда сравниваются профили шероховатости контактных поверхностей по параметру Rmr – материальный коэффициент профиля. Из таблицы видно, что формы замкнутого и сферического профилей с параметром

Rmr , равным 70%, имеет лучшее соотношение уплотняющих/уплотняемых контактных поверхностей [4].

Табл. 1. Профили поверхностей

Форма профиля поверхности	Профиль поверхности	Ra	Rz	Rmr
Форма замкнутого профиля		0,28 мкм	1,1 мкм	70%
Форма открытого профиля		0,24 мкм	1,1 мкм	15%
Форма сферического профиля		0,26 мкм	1,1 мкм	70%

В трибологической системе гидравлических уплотнений в целом предполагается смешанная смазка. При описании системы следует учитывать вклад как сухого, так и жидкого контакта. Структурная схема эластодинамического моделирования контакта показана на рисунке 3. При дальнейшем рассмотрении жидкостным контактом можно пренебречь для упрощения расчетной модели. Таким образом, рассматривается взаимодействие между микроскопическими выступами штока в зоне контакта с уплотнением без смазки. В качестве материала уплотнения принят Политетрафторэтилен или сокращенно *PTFE*.

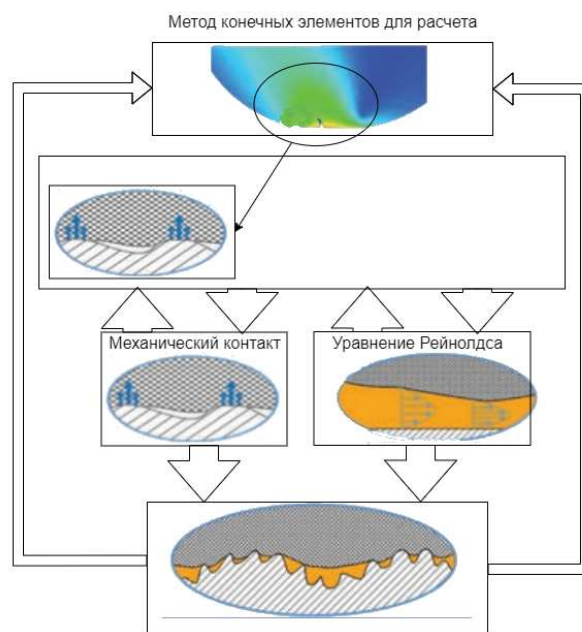


Рис. 3. Структура модели эластодинамического моделирования

На рисунке 4 показана расчетная схема исследуемой контактной задачи. Рассматривается статическая задача. При этом единичный выступ микропрофиля поверхности штока представляем в виде различных объемных фигур, принятых в соответствии с методом окончательной обработки исследуемой поверхности. Для традиционного полирования, применяемого после хромирования штока, единичные микровыступы моделируются в виде усеченных конусов, а для поверхности, обработанной алмазным выглаживанием, – в виде микросфер различных радиусов. Считаем, что единичные

выступы под действием нормальной силы F_n внедряются в уплотнение. Напряжённо-деформированное состояние (НДС) оценивается при одной и той же глубине внедрения единичных выступов.

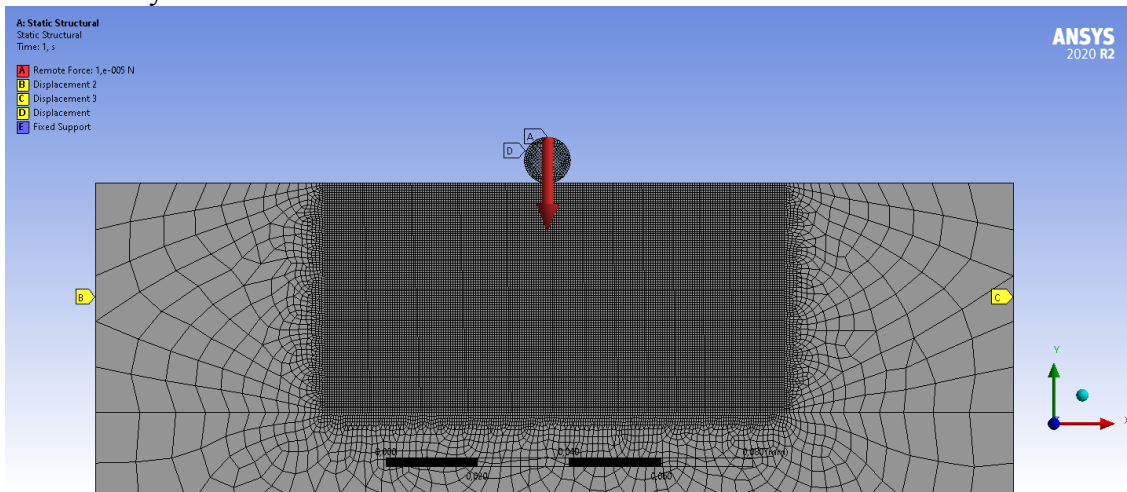


Рис. 4. Принятая расчетная схема исследования контактной задачи

Методы исследования

Моделирование и исследование НДС поверхностного слоя уплотнения при внедрении выступа выполнялось при помощи программного продукта *Ansys*, оценка напряжений проводилась с применением метода конечных элементов (МКЭ).

Материал уплотнения принимался как гиперупругий.

Для исследования контакта с гиперупругим материалом приложенная нагрузка F и глубины вдавливания z определялись через радиус контакта a по теории *JKR* с помощью формулы [5, 6]

$$a = \left(\frac{3RF}{2E^*} \right)^{1/3},$$

где R – радиус сферы, мм; F – приложенная нагрузка, Н;

E^* – комплексный модуль упругости, Па.

Глубина вдавливания по оси z определяется формулой

$$z = \left(\frac{2F}{E^*R} \right)^{1/3},$$

где эффективный модуль упругости контакта E^* определяется формулой

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right),$$

где E_1, E_2 – модули упругости контактирующих тел, Па;

ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона контактирующих тел.

Точность результатов анализа и моделирования деформационного отклика эластомерного материала при сжимающей нагрузке будет во многом зависеть от свойств материала, выбранного для анализа. Учитывалось, что эластомеры демонстрируют несжимаемость со значением коэффициента Пуассона, очень близким к 0,5, что дополнительно усугубляется нелинейным характером зависимости напряжения от деформации. Эластомеры имеют низкий модуль упругости (E) в диапазоне от 10 МПа до 4 ГПа (значение E для большинства металлов находится в диапазоне от 50 до 400 ГПа), но очень высокое относительное удлинение, достигающее 1000% (удлинение для металлов всегда меньше чем 100%) [7].

Данные по свойствам материала *PTFE*, используемые при моделировании НДС в настоящей работе, были получены экспериментальным путем при одноосном растяжении. Впоследствии с использованием программы *MCalibration*, были смоделированы различные

испытания для определения реологических свойств (характеристик) эластомера, например, при сжатии и кручении. При этом на каждом этапе испытаний модель подвергалась калибровке для получения достоверных результатов по свойствам. Данный способ определения свойств эластомеров широко применяется в научном мире при исследовании гиперупругих материалов [8,9].

В работе [9] было обнаружено, что модели Муни-Ривлина стабильны в пределах установленной границы деформации. Они дают хорошее описание материала относительно сжимающей нагрузки, приложенной к образцу.

Пяти параметрическая модель Муни-Ривлина эластомера выражена формулой [10]

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2,$$

где W – энергия деформации, I_1 и I_2 – являются уменьшенными инвариантами правого тензора деформации Коши-Грина и могут выражаться в виде основных коэффициентов растяжения, C_{10} , C_{01} , C_{20} , C_{02} , и C_{11} – материальные константы (параметры) Муни-Ривлина, которые оцениваются по данным испытаний.

Так, для материала уплотнения *PTFE* были получены безразмерные константы C_{10} , C_{01} , C_{20} , C_{02} , и C_{11} , используемые в дальнейшем для исследования НДС эластомера. Установленные параметры приведены в таблице 2. На рисунке 5 представлена полученная кривая напряжения-деформации для материала уплотнения *PTFE* в зависимости от типа нагружения.

Табл. 2. Параметры материала основанные на экспериментальных данных

Константа	<i>PTFE</i>
C_{10} (МПа)	-0,45
C_{01} (МПа)	0,71
C_{11} (МПа)	1,62
C_{20} (МПа)	2,5
C_{02} (МПа)	-0,82

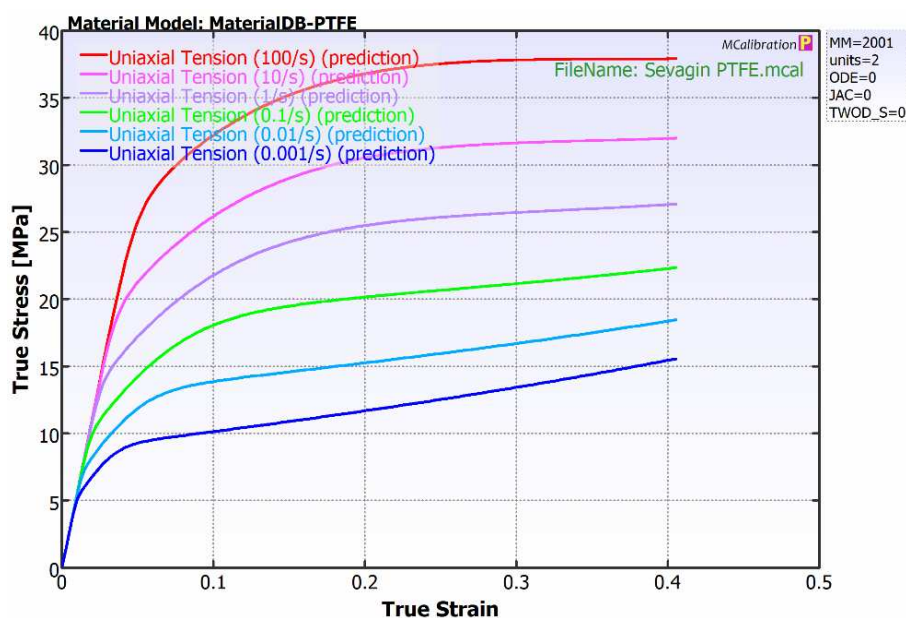


Рис. 5. Кривая напряжения деформации для материала уплотнения *PTFE*

Результаты и их обсуждения

В результате компьютерного моделирования были выявлены значения напряжений и глубины вдавливания единичного микровыступа поверхности штока. На рисунке 6 представлено поле напряжений для единичной неровности в форме усеченного конуса. Из рисунка видно, что наибольшая концентрация напряжений в эластомере наблюдается под

периферийными участками выступа (в зоне максимального контактного давления) на глубине от 0,001 мм от поверхности деформированного участка и составляет 4,7 МПа. Принимая во внимание циклический возвратно-поступательный характер относительного движения при контакте штока с уплотнением, можно констатировать, что при достижении критического цикла нагружения, в этих участках начнут отделяться частицы уплотнения наряду с усилением износа краевого участка микровыступа штока.

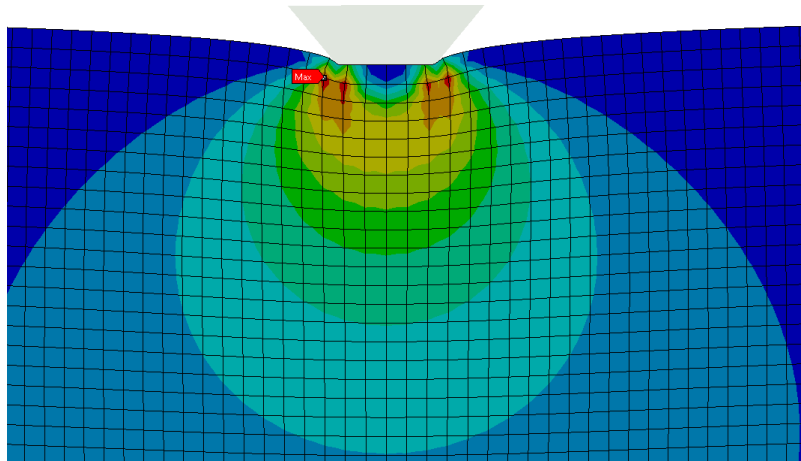


Рис. 6. Напряжение при внедрении единичной неровности в форме усеченного конуса

На рисунке 7 представлено поле напряжений для единичной неровности в форме сферы радиусом 10 мкм, получаемой после алмазного выглаживания. Область максимальной концентрации напряжений наблюдается в данном случае под наиболее выступающей частью профиля (на участках с максимальным контактным давлением) на такой же глубине, как в случае усеченного конуса. Максимальное напряжение здесь составляет 2,53 МПа.

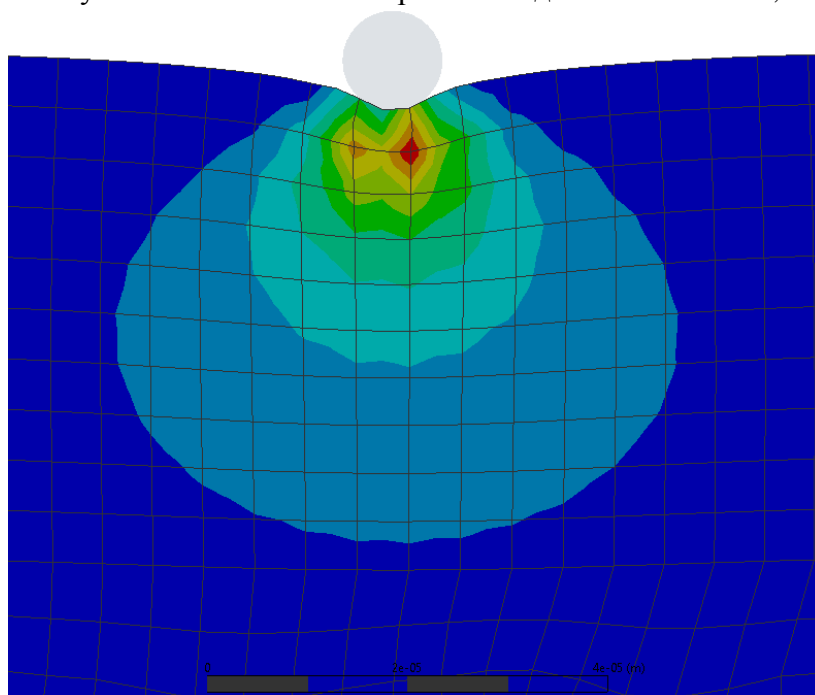


Рис. 7. Напряжение для единичной неровности в форме сферы $R = 10$ мкм

На рисунке 8 представлена форма концентрации напряжений для единичной неровности в форме сферы радиусом 50 мкм, получаемой после алмазного выглаживания. В этом случае, по сравнению с предыдущими, возникают напряжения, не превышающие 0,86 МПа, что указывает на наиболее благоприятные условия контакта единичного выступа с эластомером.

В таблице 3 показаны параметры, полученные при помощи МКЭ в результате моделирования контакта и выполненные аналитическим методом.

Распределение максимальных напряжений под поверхностью полупространства в плоскости Z представлено на рисунке 9.

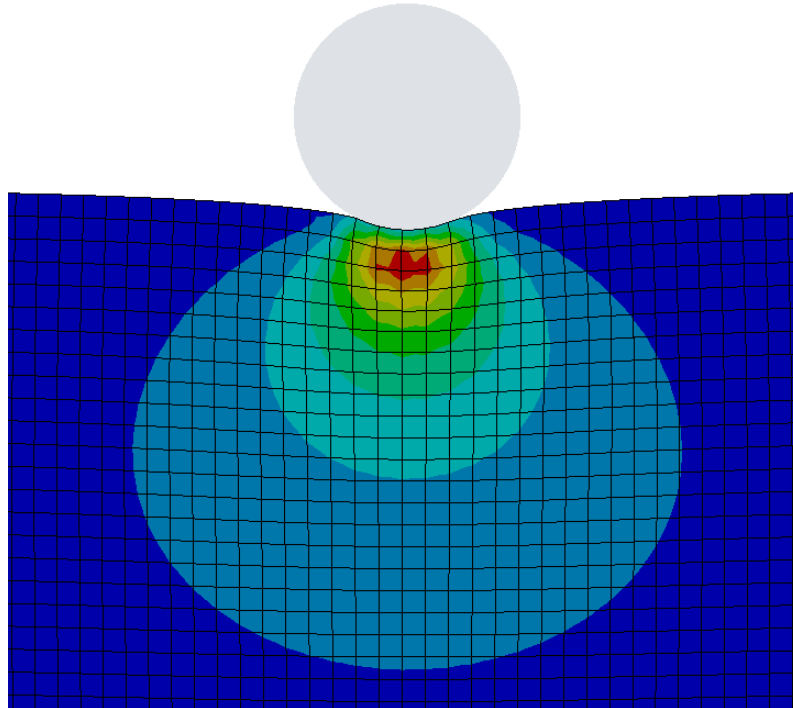


Рис. 8. Напряжение для единичной неровности в форме сферы $R = 50$ мкм

Табл. 3. Параметры полученные МКЭ и аналитическим методом

Форма профиля единичного выступа	Глубина вдавливания, мм	Максимальное напряжение, МПа
Сфера 10 мкм (алмазное выглаживание)	0,002	2,53
Сфера 50 мкм (алмазное выглаживание)	0,002	0,86
Усечённый конус (полирование)	0,002	4,7

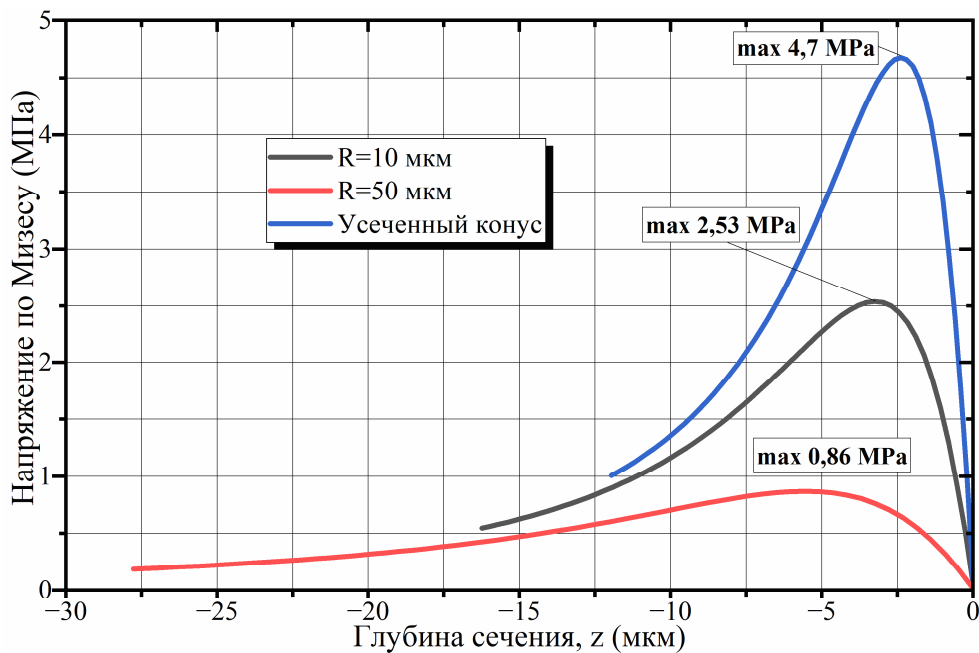


Рис. 9. Распределение напряжений по глубине полупространства при внедрении единичных выступов различных профилей

Проанализировав данные по возникающим в уплотнении напряжениям, делаем вывод, что наиболее благоприятной формой микропрофиля штока для контакта с уплотнением является сфера радиусом 50 мкм, полученная финишной обработкой таким методом как алмазное выглаживание, профилограмма единичных микронеровностей и топография поверхности представлена на рисунке 10 и 11.

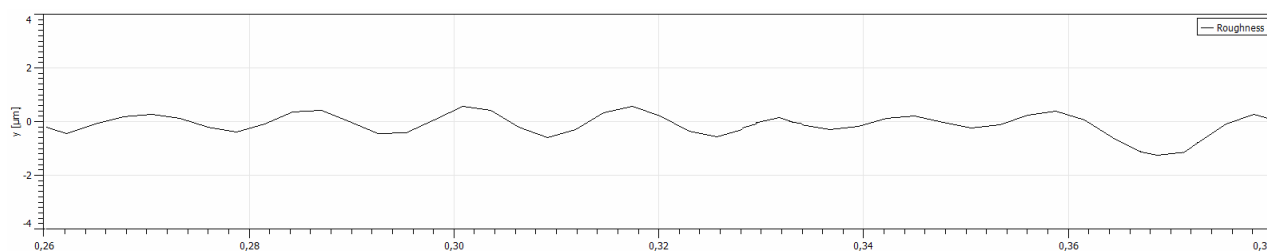


Рис. 10. Профилограмма единичных микронеровностей образца с радиусом единичного выступа $R = 50$ мкм полученного после алмазного выглаживания

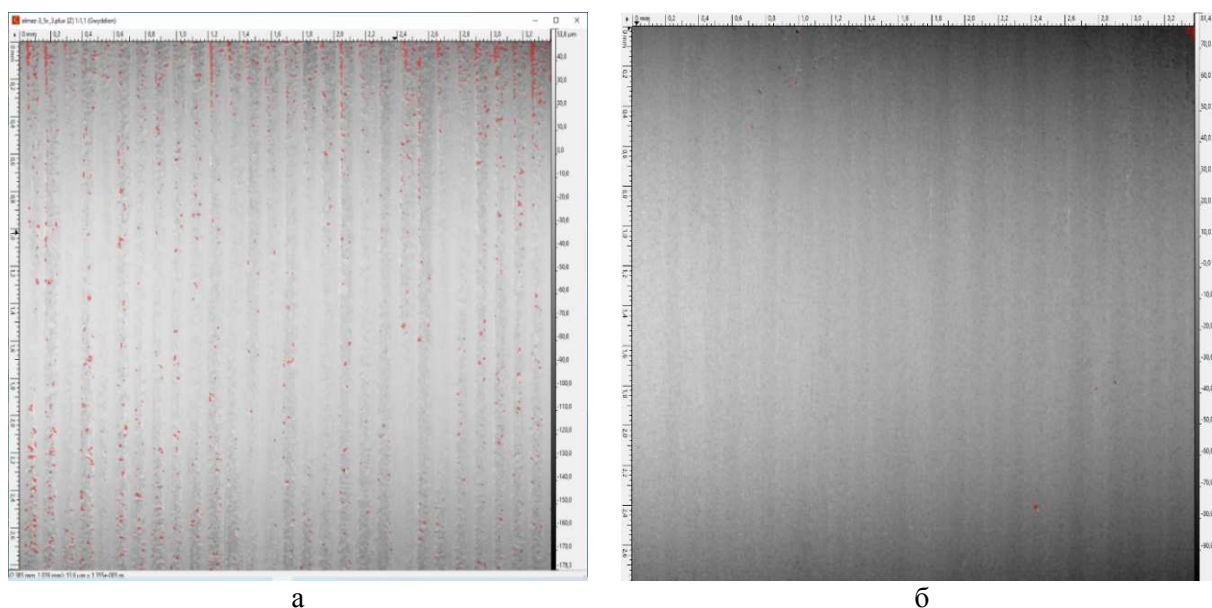


Рис. 11. Топография поверхности а) образца после полирования с единичным выступом в форме усеченного конуса; б) образца после алмазного выглаживания с радиусом единичного выступа $R = 50$ мкм

Заключение

В итоге проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Проанализированы требования к микропрофилю поверхности штока, при работе в контакте с уплотнением, а также различные модели взаимодействия единичных выступов поверхности на предмет исследования НДС эластомера.

2. Для описания характера взаимодействия уплотнения со штоком определены свойства эластомера при помощи экспериментальных исследований и моделирования различных испытаний в программе *MCalibration*.

3. На основе анализа НДС эластомера при взаимодействии с единичными выступами различной формы установлено, что наиболее благоприятными являются условия контакта уплотнения с поверхностью штока, микропрофиль которого описывается сферами с радиусом микропрофиля 50 мкм.

Установлено, что предпочтительным методом отделочной обработки штоков является алмазное выглаживание, поскольку обеспечивает требуемый микропрофиль поверхности штока, что создает наиболее благоприятные условия контакта его с уплотнением, и тем самым способствует увеличению ресурса сопрягаемой пары трения.

Список литературы

1. Закупки АО «Воркутауголь», Северсталь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vorkutaugol.ru/rus/customers/purchases/index.phtml>.
2. Cook M., Volpenhein K. Beyond Ra. Why Surface finish matters in seal performance // Fluid power journal. 2019, no. 2, pp. 32-34.
3. Keropyan A.M., Gorbatyuk S.M., Bibikov P.Y., Bardovski A.D. Influence of Roughness of Working Surfaces of the Wheel–Rail System of Open-Pit Locomotives with an Implementable Adhesion Coefficient // Journal of Friction and Wear. 2019, vol. 40, pp. 73-79. DOI: 10.3103/S1068366619010082.
4. Севагин С.В., Вержанский А.П. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 35-44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_35.
5. Johnson K.L. Contact Mechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 452 p.
6. Мур Д. Трение и смазка эластомеров. – М.: Химия, 1977. – 262 с.
7. Skowrońska J., J. Skowrońska, Kosucki A., Stawiński Ł. Overview of Materials Used for the Basic Elements of Hydraulic Actuators and Sealing Systems and Their Surfaces Modification Methods // Materials. 2021, no. 14, vol. 6 (1422), pp. 1-24. DOI: 10.3390/ma14061422.
8. Мурина Т.А., Кузнецов В.В., Водяков В.Н. Определение параметров гиперупругих моделей материалов в пакете ANSYS // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф.Х. Бурумкулова / ред. П.В. Сенин. – Саранск, 2016. – С. 670.
9. Abubakar I.J., Myler Peter, Erping Zhou Constitutive modelling of elastomeric seal material under compressive loading // Modeling and Numerical Simulation of Material Science. 2016, no. 6, pp. 28-40.
10. Okeke C.P., Thite A.N., Durodola J.F., Greenrod M.T. Hyperelastic polymer material models for robust fatigue performance of automotive LED lamps // Procedia Structural Integrity. 2017, vol. 5, pp. 600-607. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.022.

References

1. Procurement of JSC "Vorkutaugol", Severstal [Electronic resource]. – Access mode: <https://vorkutaugol.ru/rus/customers/purchases/index.phtml>.
2. Cook M., Volpenhein K. Beyond Ra. Why Surface finish matters in seal performance // Fluid power journal. 2019, no. 2, pp. 32-34.
3. Keropyan A.M., Gorbatyuk S.M., Bibikov P.Y., Bardovski A.D. Influence of Roughness of Working Surfaces of the Wheel–Rail System of Open-Pit Locomotives with an Implementable Adhesion Coefficient // Journal of Friction and Wear. 2019, vol. 40, pp. 73-79. DOI: 10.3103/S1068366619010082.
4. Sevagin S.V., Verzhansky A.P. Quality control in manufacture of hydraulic cylinder rods for load–haul–dumpers // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. 5, pp. 35-44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_35.
5. Johnson K.L. Contact Mechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 452 p.
6. Moore D. Friction and lubrication of elastomers. – М.: Chemistry, 1977. – 262 p.
7. Skowrońska J., J. Skowrońska, Kosucki A., Stawiński Ł. Overview of Materials Used for the Basic Elements of Hydraulic Actuators and Sealing Systems and Their Surfaces Modification Methods // Materials. 2021, no. 14, vol. 6 (1422), pp. 1-24. DOI: 10.3390/ma14061422.
8. Murina T.A., Kuznetsov V.V., Vodiakov V.N. Determination of parameters of hyperelastic models of materials in the ANSYS package // Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: collection of scientific papers of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of doctor of technical sciences, professor F.H. Burumkulov / ed. P.V. Senin. – Saransk, 2016. – P. 670.
9. Abubakar I.J., Myler Peter, Erping Zhou Constitutive modelling of elastomeric seal material under compressive loading // Modeling and Numerical Simulation of Material Science. 2016, no. 6, pp. 28-40.
10. Okeke C.P., Thite A.N., Durodola J.F., Greenrod M.T. Hyperelastic polymer material models for robust fatigue performance of automotive LED lamps // Procedia Structural Integrity. 2017, vol. 5, pp. 600-607. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.022.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Севагин Сергей Васильевич – аспирант	Sevagin Sergey Vasilevich – graduate student
Соловых Данила Янисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Горное оборудование, транспорт и машиностроение»	Solovykh Danila Yanisovich – candidate of technical sciences, associate professor of Department of mining equipment, transport and mechanical engineering
Мнацакяня Виктория Умедовна – д.т.н., профессор кафедры «Горное оборудование, транспорт и машиностроение» sevaginsv@yandex.ru	Mnatsakanyan Victoria Umedovna – doctor of technical sciences, professor of Department of mining equipment, transport and mechanical engineering

Получена 31.05.2022