

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-99-107

Баимур К.А., Петровский Э.А.Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа***E-mail: bashmur@bk.ru*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЯЧЕИСТОГО РЕЛЬЕФА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. Целью работы является исследование цилиндрических поверхностей деталей с рельефом, отличительной особенностью которого является ячеистая форма, представляющая собой эллиптический параболоид с неравными положительными параметрами. Гипотеза исследования состоит в высоком потенциале использования ячеистого рельефа, связанным со снижением приработочного износа технологических агрегатов, при обеспечении формой рельефа гидродинамической несущей способности смазочного слоя. Задачи исследования свелись к параметрическому анализу поведения смазочного слоя в зазоре с ячейкой рельефа при помощи построения аналитической модели, основанной на теории гидродинамической смазки, а также компьютерного гидродинамического моделирования (CFD) в программном обеспечении ANSYS Fluent, где для замыкания уравнений переноса была принята модель турбулентности SST $k-\omega$. Выявлено, что максимальная гидродинамическая несущая способность возникает при глубине ячейки 0,128 мм и приходится на 21/25 часть большой оси эллипса ячейки, что показали обе модели, чем верифицирована их приемлемая точность. Также вычислено максимальное подъемное гидродинамическое давление на одной ячейке, составившее 3 кПа. По результатам параметрического анализа можно констатировать существенный потенциал использования ячеистого рельефа для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей.

Ключевые слова: ячеистый рельеф, фрикционный износ, цилиндро-поршневая группа, гидродинамическая модель, ANSYS Fluent, двухмерный параметрический анализ, математическая модель.

Введение. Эксплуатация технологических агрегатов показывает, что трущиеся поверхности их деталей зачастую работают с недостаточной смазкой, что приводит к образованию зазубрин, захвату и заеданию трущихся поверхностей этих деталей [1]. Таким образом, двигатели, насосы и компрессоры часто страдают от износа трущихся пар, к которым относятся: гильза цилиндра – поршневое кольцо; вал – подшипник скольжения; поршневой палец – шатун и другие [2]. Тяжелое трибологическое состояние оказывает большое влияние на надежность трущихся пар и их эксплуатационные свойства. Известно, что в поршневых агрегатах наиболее энергоемким по критерию механических потерь и высоко изнашиваемым сопряжением является пара цилиндр – поршневое кольцо. В частности, обзор литературы показывает, что около 45 % механических потерь в автомобильных двигателях приходится на трение в цилиндро-поршневой группе [3]. В результате действия высокой температуры и давления в области упомянутых пар трения, обнаруживается их сложный механизм износа, связанный с адгезионным, абразивным и другими его видами, что обнаруживает склонность данных пар трения и агрегатов к отказам [4]. Отказы агрегатов могут привести к авариям и значительным экономическим потерям [5].

Возможности конструктивных изменений для улучшения подачи смазки на трущиеся поверхности без усложнения конструкции агрегатов практически исчерпаны или экономически нецелесообразны. Одно из немногочисленных возможных решений заключается в улучшении удержания смазки на трущихся поверхностях [6]. Осуществление данного решения известно и заключается в оптимизации рельефа рабочих поверхностей трущихся деталей с использованием различных технологий его нанесения, предоставляющих практически неограниченные средства управления всеми геометрическими параметрами формируемого рельефа поверхности [7, 8]. При приближении рабочего органа, например, поршневого кольца, к элементу рельефа давление смазки в нем сначала падает, а затем повышается, что создает перепад давления на элементе и формирует его несущую способность. Одним из преимуществ данного метода является возможность его осуществления во время ремонта оборудования, например, пластинированием цилиндрической поверхности детали [9].

Моделирование геометрии поверхности привлекает всё большее внимание, поскольку изменением геометрии поверхности можно сравнительно просто улучшить трибологические характеристики пар трения. Исследование различных

геометрических форм рельефа и их трибологических свойств имеет как теоретическое значение, так и прикладную перспективу для проектирования и получения соответствующей геометрической морфологии [10]. Для изучения трения между поршнем (поршневым кольцом) и гильзой цилиндра путем чередования геометрии поверхности были разработаны различные модели. В частности, исследователи отмечают [11, 12], что смазывающий эффект был лучше, когда поршневое кольцо имело правильную микроструктуру в виде ямочного рельефа параболического профиля, а его доля в площади поверхности составляла 15 %.

Циклическая форма движения рабочего органа агрегата способствует постепенному износу любой заданной формы рельефа в области его периферии вдоль движения органа ввиду образования зон повышенных контактных давлений. Это приводит к вырождению изначального рельефа, как отмечается опытом эксплуатации и экспериментальными исследованиями [6, 13], в ячеистую форму, то есть вырождением параболоида вращения в эллиптический параболоид с неравными положительными параметрами. Таким образом, в процессе приработки и работы агрегата имеет место существенное выкрашивание материала, вызывающего потерю проектных эксплуатационных свойств рельефа и цилиндрической поверхности, вторичное выкрашивание и другие негативные следствия. Экспериментально установлено, что проектно эллиптическая форма рельефа способствует уменьшению приработочного износа [13]. При этом об эксплуатационных свойствах цилиндрических поверхностей с ячеистым рельефом информации в известной литературе не обнаружено. Эксплуатационные свойства поверхности с рельефом обеспечиваются прежде всего той гидродинамикой смазочного слоя – гидродинамической несущей способностью, которая возникает посредством формы рельефа.

Исходя из вышесказанного, целью настоящего исследования является анализ эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей с ячеистым рельефом. Таким образом, выделены следующие задачи исследования: создание аналитической и компьютерной гидродинамической моделей (CFD) поведения смазочного слоя на цилиндрической поверхности с ячеистым рельефом эллиптической формы, их анализ и сопоставление результатов.

Аналитическая модель. Теория гидродинамической смазки основывается на дифференциальном уравнении Рейнольдса [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu v \frac{dh}{dx} + 12\mu U, \quad (1)$$

где x, y – координаты в направлении по касательной к внутренней поверхности расточки подшипника и по толщине смазочного слоя; $p = p(x, y)$ – давление в смазочном слое; v – проекция скорости поверхности трения на ось x ; U – скорость сближения поверхностей трения; μ – динамическая вязкость жидкости; $h(x)$ – функция толщины смазочного слоя.

Допустив, что движение по координате y отсутствует и давление вдоль нее не изменяется, уравнение (1) примет вид [15]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6\mu v \frac{dh}{dx}. \quad (2)$$

Его интеграл:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu v \frac{h - h_0}{h^3}, \quad (3)$$

где h – высота зазора; h_0 – высота зазора, при которой градиент давления по длине зазора $dp/dx = 0$ и $p = \max$.

Следуя методике, представленной в [16] с учетом (2) и расчетной схемы на Рисунке 1, получили выражение (4), описывающее распределение гидродинамического давления масла для произвольной (интегрируемой) функции толщины смазочного слоя $h(x)$ на длине L :

$$p(x) = 6\mu v \left[\frac{\int_0^L \frac{dx}{h^2(x)} \int_0^x \frac{dx}{h^3(x)} - \int_0^x \frac{dx}{h^2(x)} \right] \quad (4)$$

Опираясь на рисунок 1, составим уравнения, описывающие в безразмерной форме профиль зазора. Для облегчения задачи, так как размеры достаточно малы, примем, что функция толщины смазочного слоя будет линейной, тогда $h(x)$ будет описываться системой уравнений:

$$h(x) = \begin{cases} \frac{xh_p}{l} + h_0, & x \in [0; l]; \\ -\frac{xh_p}{l} + h_0, & x \in [l; L]. \end{cases} \quad (5)$$

где $l = L/2$.

Подставляя полученные выражения интегралов в выражение (4), получим систему уравнений, описывающую распределение гидродинамического давления масла в зазоре по двум участкам профиля:

$$p(x) = 6\mu v \begin{cases} \frac{h_p l x(l-x)}{(2h_0 + h_p)(h_0 l + h_p x)^2}, & x \in [0; l]; \\ \frac{h_p l(2l^2 - 3lx + x^2)}{(2h_0 + h_p)(h_0 l + 2h_p l - h_p x)^2}, & x \in [l; L]. \end{cases} \quad (6)$$

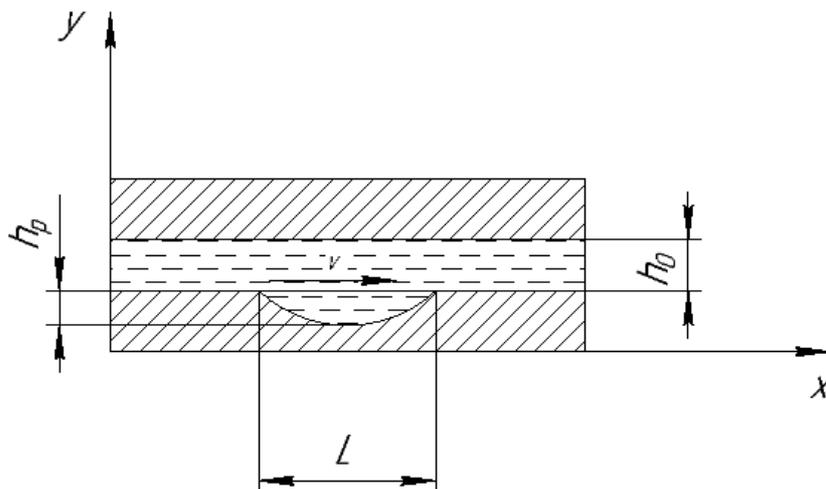


Рис. 1. Расчетная схема эллиптической ячейки

Найдем погонную (отнесенную к единице ширины) гидродинамическую несущую способность P_n эллиптической ячейки. Так как профиль зазора симметричен, то будет достаточно найти несущую способность для половины профиля.

Проинтегрируем выражение (6) по переменной x в пределах от 0 до l и после элементарных преобразований получим выражение несущей способности для половины профиля эллиптической ячейки:

$$P_n = 6\mu v \int_0^l \frac{h_p l x(l-x)}{(2h_0 + h_p)(h_0 l + h_p x)^2} dx = \frac{l^2 \left(2h_p - 2h_0 \ln \left(\frac{l(h_0 + h_p)}{h_p} \right) - h_p \ln \left(\frac{l(h_0 + h_p)}{h_p} \right) + 2h_0 \ln \left(\frac{lh_0}{h_p} \right) + h_p \ln \left(\frac{lh_0}{h_p} \right) \right)}{h_p^2 (2h_0 + h_p)} \quad (7)$$

Для поршней в цилиндрах компрессоров согласно ГОСТ 25347-2013 и [17] предпочтительно применение ходовой посадки H7/f7. Для цилиндрического соединения диаметром 280 мм имеем: верхнее отклонение цилиндра – +0,052 мм, нижнее – 0; верхнее отклонение поршневого кольца – -0,056, нижнее – -0,108 мм. Поле допусков системы цилиндр-поршень представлено на рис. 2.

В качестве зазора h_0 примем средний зазор S_c , тогда $h_0 = 0,108$ мм.

Методология CFD-анализа. Геометрические параметры эллиптической ячейки (табл. 1), необходимые для проведения компьютерного гидродинамического моделирования, были взяты

из вышеприведенной математической модели. Вид расчетной области представлен на рисунке 3 и построен посредством программного продукта SolidWorks.

Таблица 1

Геометрические параметры ячейки

Параметр	Значение
Максимальная глубина ячейки, мм	0,260
Размер малой оси эллипса, мм	3,78
Размер большой оси эллипса, мм	8,0
Высота зазора, мм	0,108

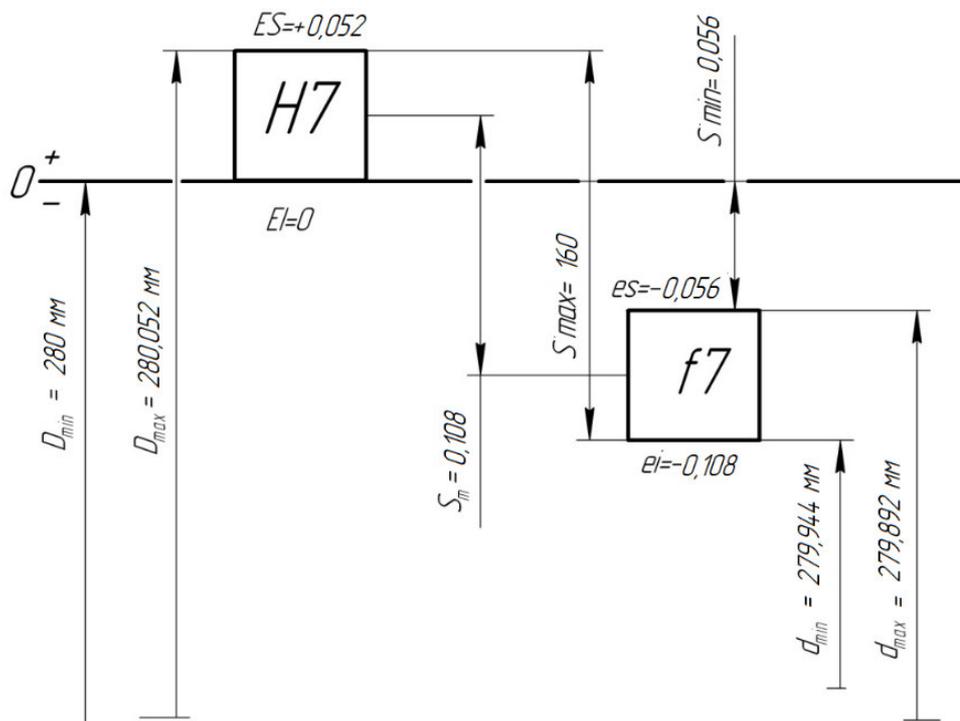


Рис. 2. Схема расположения полей допусков

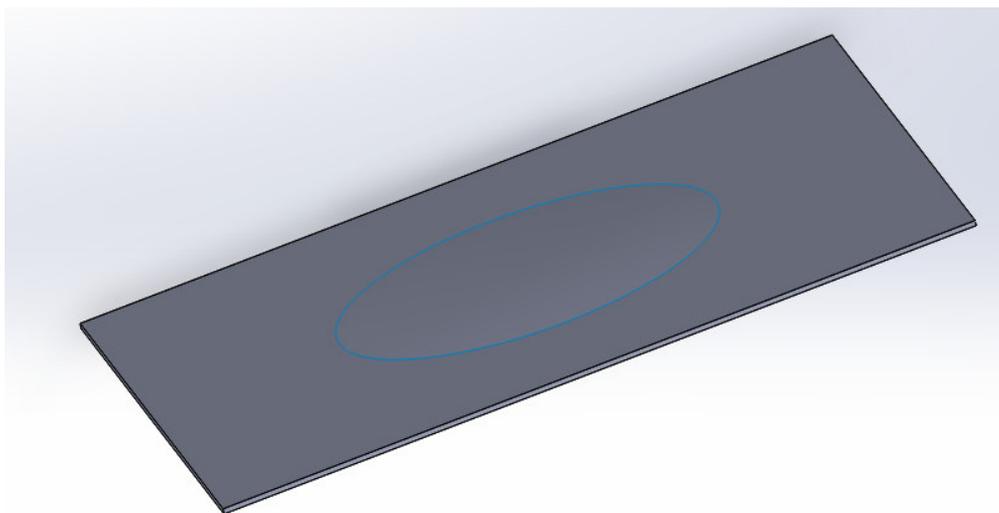


Рис. 3. 2D геометрия расчетной области

Все вычисления проводились на основе метода конечных объемов с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Метод основан на схеме второго порядка точности, для решения уравнений переноса как для ламинарной, так и для турбулентной моделей. Для замыкания уравнений была принята модель турбулентности Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$. Эта модель обеспечивает более высокую точность и надежность прогнозирования течений вблизи стенок, так как учитывает перенос турбулентных касательных напряжений и обеспечивает точные прогнозы потока для случаев с неблагоприятными градиентами давления, связанных с отрывом потока. Подробное описание используемой модели

SST $k-\omega$ и уравнений переноса представлено в [18]

Была создана расчетная сетка. Ее калибровка производилась на основе анализа чувствительности, основанного на независимости размера сетки. Уточнение проводилось до тех пор, пока результаты не стали сопоставимы значениям, полученным в математической модели. Использовались четырехугольные элементы с уплотненным размером ячеек от 0,03 мм в ячейке до 0,04 мм в остальной части сетки. Общее количество элементов – 36190.

Заданы свойства рабочей жидкости (масла): вязкость – 10 мм²/с, плотность – 800 кг/м³.

Были заданы граничные условия на заранее подготовленных при построении сетки гранях. Так как мы приняли нулевые граничные условия, то давление на входе и выходе принято равным нулю. Верхняя граница имитирует стенку гильзы цилиндра, поэтому мы задаем стенку неподвижной. Нижняя граница имитирует поршневое кольцо, поэтому мы задали ей скорость – 1 м/с.

Результаты. Как показывают исследования [16], максимальную несущую способность при

прочих равных условиях обеспечил микрорельеф с соизмеримым по отношению к заданной осевой высоте поршневого кольца шагом. Таким образом, примем, что $l = 8$ мм.

Подставим значения в выражение (7) и получим зависимость погонной гидродинамической несущей способности смазки от текущей глубины эллиптической ячейки. График зависимости представлен на рисунке 4.

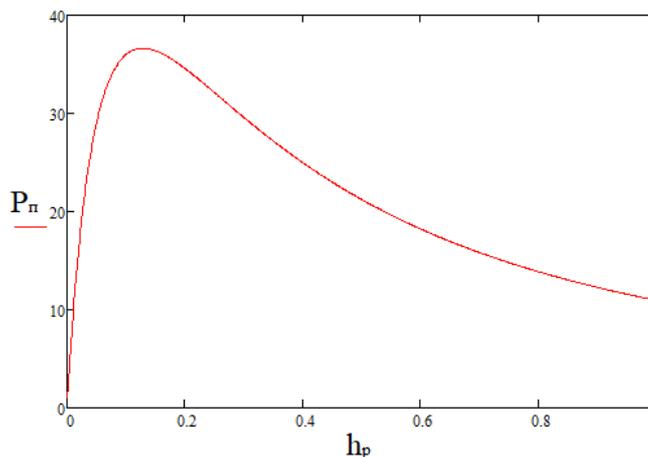


Рис. 4. Зависимость погонной гидродинамической несущей способности смазки от текущей глубины h_p эллиптической ячейки

Из рисунка 4 видно, что максимальная гидродинамическая несущая способность возникает при $h_p = 0,128$ мм.

Чтобы проверить действительно ли микрорельеф с соизмеримым по отношению к заданной

осевой высоте поршневого кольца шагом обеспечивает максимальную гидродинамическую несущую способность, представим зависимость несущей способности от двух переменных h_p и $l/2$ (рис. 5).

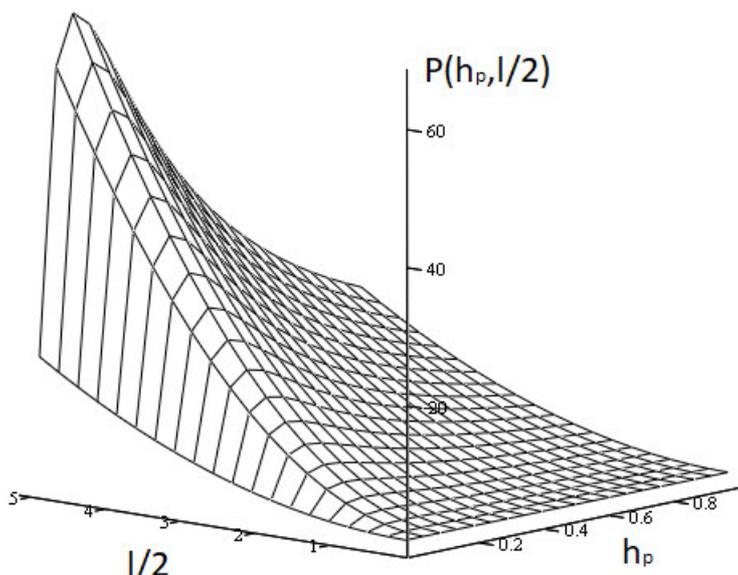


Рис. 5. Зависимость погонной гидродинамической несущей способности от текущих глубины h_p и длины $l/2$ эллиптической ячейки

Как видно из рисунка 5, максимальная погонная гидродинамическая несущая способность смазки будет при $l/2 = 4$ мм. Задавать это значение большим нельзя, так как это приведет к

уменьшению степени сжатия поршневого компрессора.

Визуально распределение гидродинамической нагрузочной способности смазки в зазоре с эллиптической ячейкой показано на рис. 6.

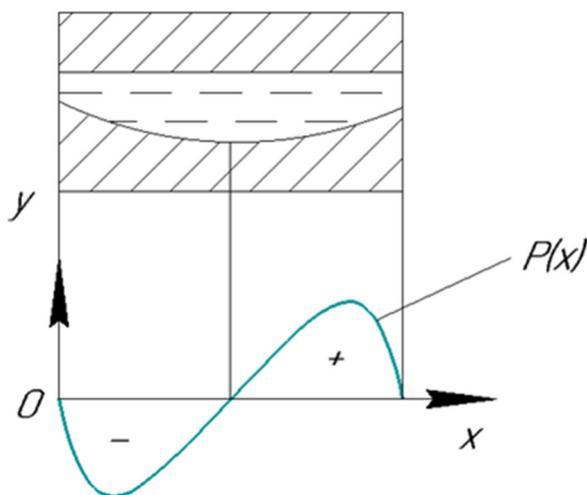


Рис. 6. Распределение гидродинамической нагрузочной способности смазки в зазоре с эллиптической ячейкой

Как видно из рисунка 6, на первой половине участка гидродинамическая нагрузочная способность $P(x)$ нелинейно уменьшается, а потом возрастает до 0. Это происходит ввиду того, что высота зазора увеличивается в направлении движения. Затем следует уменьшение зазора, что приводит к увеличению нагрузочной способности. Максимум нагрузочной способности приходится на 21/25 часть большой оси эллипса ячейки, после чего уменьшается до 0.

Посредством программного обеспечения ANSYS Fluent при помощи функции контур можем получить распределение давления в смазочном слое, которое показано на рисунке 7. Для большей наглядности выставлено 100 контуров. Наложенная бирюзовая кривая линия на рисунке 7 иллюстрирует результаты распределения нагрузочной способности с аналитической модели.

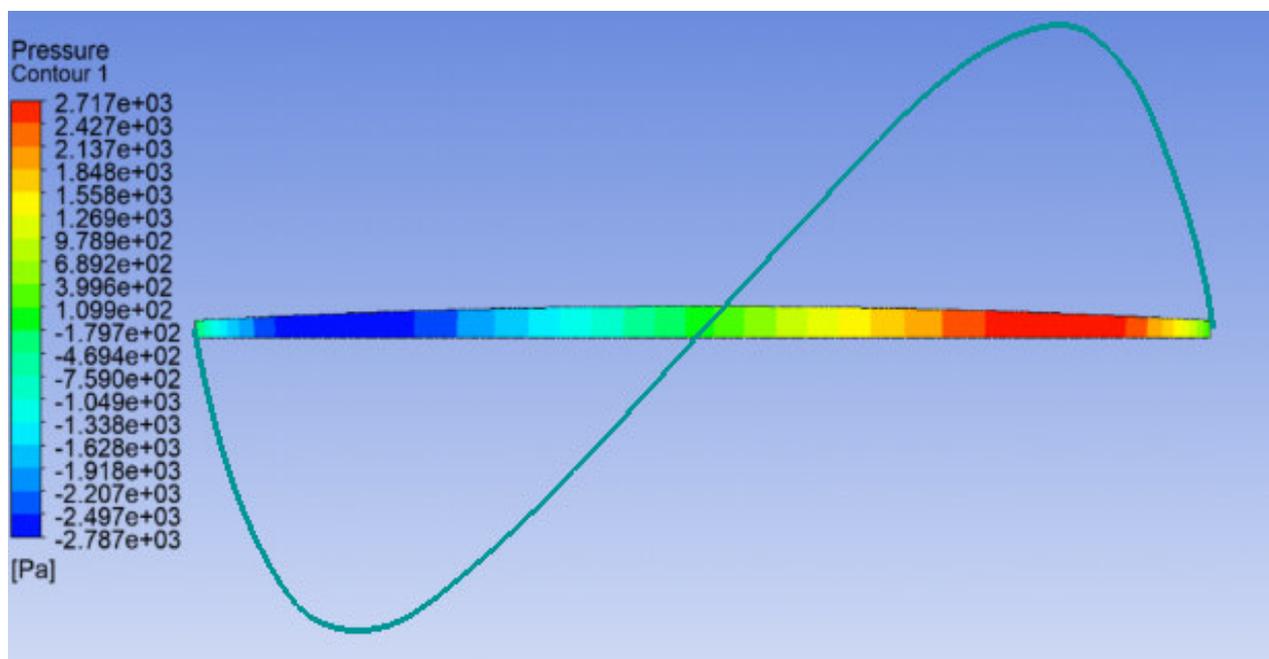


Рис. 7. Эпюра распределения гидродинамического давления масла в зазоре с эллиптической ячейкой

Сопоставляя результаты CFD-модели с аналитическим решением, можем сделать вывод об адекватности полученного результата. Так как мы принимали нулевые граничные условия, то давление на входе и выходе, а также в центральной зоне ячейки принимает нулевые значения. Расположение максимума и минимума давления смазочного слоя так же сходится с аналогичными данными по нагрузочной способности, полученной с аналитической модели, что наглядно видно на рисунке 7. Численные результаты показывают, что ячеистый рельеф с эллиптической формой, нанесенный на гильзу, потенциально может снизить износ поршневого кольца, так как одна ячейка обеспечивает дополнительное подъемное гидродинамическое давление в ~ 3 кПа. При этом

вопрос о геометрических параметрах ячейки эллиптического типа, обеспечивающей наибольшую нагрузочную способность, планируется раскрыть в дальнейших работах, как и вопрос о технологии формирования поверхностей с ячеистым рельефом.

Выводы.

1. Выдвинута гипотеза о высоком потенциале использования ячеистого рельефа эллиптической формы для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей при снижении приработочного износа технологических агрегатов.

2. Получена основанная на теории гидродинамической смазки аналитическая модель пове-

дения смазочного слоя на цилиндрической поверхности с ячеистым рельефом эллиптической формы.

3. При помощи программного обеспечения ANSYS Fluent получена компьютерная гидродинамическая модель (CFD) поведения смазочного слоя на цилиндрической поверхности с ячеистым рельефом эллиптической формы.

4. Аналитическая модель показала, что максимальная гидродинамическая несущая способность возникает при глубине ячейки 0,128 мм, что приходится на 21/25 часть большой оси эллипса ячейки.

5. Посредством гидродинамической CFD-модели вычислено подъемное гидродинамическое давление на одной ячейке, составившее ~3 кПа.

6. Расположение максимума и минимума давления смазочного слоя по ячейке сходится с аналогичными данными по нагрузочной способности, полученной с аналитической модели, что говорит о приемлемой точности моделей.

7. По результатам исследования можно констатировать существенный потенциал использования ячеистого рельефа эллиптической формы для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей. При этом требуются дополнительные исследования ячеистого рельефа как в области оптимальных геометрических параметров ячеек, так и в технологии его формирования.

Источник финансирования. Исследование поддержано стипендиальной программой Совета по грантам при Президенте Российской Федерации, проект СП-1051.2022.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнейдер Ю.Г., Гузок Я.В. Влияние микрорельефа трущихся пар герметичных холодильных компрессоров на их долговечность // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1973. № 5. С. 30–32.

2. Guo Z., Yuan C., Liu P. Peng Z., Yan X. Study on influence of cylinder liner surface texture on lubrication performance for cylinder liner-piston ring components // Tribology letters. 2013. № 51. Pp. 9–23. doi: 10.1007/s11249-013-0141-y.

3. Taylor C.M. Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability // Wear. 1998. № 221(1). Pp. 1–8. doi: 10.1016/S0043-1648(98)00253-1.

4. Dokshanin S.G., Tynchenko V.S., Bukhtoyarov V.V., Bashmur K.A., Kukartsev V.V. Investigation of the tribological properties of ultrafine diamond-graphite powder as an additive to greases //

IOP conference series: materials science and engineering. 2019. № 560. 012192. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012192.

5. Bukhtoyarov V.V., Zyryanov D.K., Bukhtoyarova N.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.V., Bashmur K.A. Expert analysis of elements of the diagnostic system for compressor technological equipment // Journal of physics: conference series. 2019. № 1399. 044113. doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044113.

6. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом : монография. Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.

7. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units // Journal of physics: conference series. 2019. № 1399. 055032. doi: 10.1088/1742-6596/1399/5/055032.

8. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Федоренко Т.М. Исследование обеспечения необходимой шероховатости поверхности крупногабаритных вращающихся деталей приставными станочными модулями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С. 35–38.

9. Соболев Н.И., Титунин Б.А. Пластинирование деталей машин : монография. Л.: Машиностроение, 1987. 224 с.

10. Zhao W., Wang L., Xue Q. Influence of micro/nano-textures and chemical modification on the nanotribological property of Au surface // Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects. 2010. № 366(1–3). Pp. 191–196. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.06.006.

11. Liu C., Lu Y.-J., Zhang Y.-F., Li S., Müller N. Numerical study on the lubrication performance of compression ring-cylinder liner system with spherical dimples // PLoS ONE. 2017. № 12(7). e0181574. doi: 10.1371/journal.pone.0181574.

12. Zhang Y., Zeng L., Wu Z., Ding X., Chen K. Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston // Micro & nano letters. 2019. № 14(4). Pp. 424–429. doi: 10.1049/mnl.2018.5535.

13. Петровский Д.Э., Петровский Э.А. Инструментальные ротационные модули для обработки деталей технологических машин : монография. Старый Оскол : ТНТ, 2017. 196 с.

14. Захаров С.М. Гидродинамическая смазка: состояние и перспективы // Трение и износ. 2010. № 31(1). С. 78–92.

15. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники : учебник для вузов. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.

16. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний : учебное пособие. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 288 с.

17. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: справочник в 2 ч.: ч.1. СПб : Политехника, 2001. 576 с.

<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm> (дата обращения 15.06.2022).

18. ANSYS Fluent Theory Guide. Системные требования: Интернет браузер. URL:

Информация об авторах

Башмур Кирилл Александрович, старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса. E-mail: bashmur@bk.ru. Институт нефти и газа Сибирского федерального университета. Россия, 660041, Красноярск, Свободный просп., д. 82, стр. 6.

Петровский Эдуард Аркадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса. E-mail: petrovsky_quality@mail.ru. Институт нефти и газа Сибирского федерального университета. Россия, 660041, Красноярск, Свободный просп., д. 82, стр. 6.

Поступила 28.07.2022 г.

© Башмур К.А., Петровский Э.А., 2022

***Bashmur K.A., Petrovsky E.A.**

Siberian Federal University

*E-mail: bashmur@bk.ru

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF CELL RELIEF TO PROVIDE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CYLINDRICAL SURFACES OF TECHNOLOGICAL UNITS

Abstract. The work is aimed to study the cylindrical surfaces of parts with a cellular shape surfaces, which is an elliptical paraboloid with unequal positive parameters. The hypothesis of the study is the high potential of using a cellular relief, associated with a decrease in the running-in wear of technological units, while providing the hydrodynamic bearing capacity of the lubricating layer with the shape of the relief. The objectives of the study are reduced to a parametric analysis of the behavior of the lubricating layer in a gap with a relief cell using the construction of an analytical model based on the theory of hydrodynamic lubrication. In addition, the computer fluid dynamic simulation in the ANSYS Fluent software, where the SST turbulence model is adopted to close the transport equations $k-\omega$. It is found that the maximum hydrodynamic bearing capacity occurs at a cell depth of 0.128 mm and falls on 21/25 of the major axis of the cell ellipse. It is shown by both models, which verified their acceptable accuracy. The maximum lifting hydrodynamic pressure on one cell is also calculated, which amounted to 3 kPa. The results of parametric analysis state a significant potential for using a cellular relief to ensure the operational properties of cylindrical surfaces.

Keywords: cell relief, frictional wear, cylinder-piston group, hydrodynamic model, ANSYS Fluent, two-dimensional parametric analysis, mathematical model.

REFERENCES

1. Shneider Yu.G., Guzok Ya.V. Influence of the microrelief of rubbing pairs of hermetic refrigeration compressors on their durability [Vliyaniye mikrorel'yefa trushchikhsya par germetichnykh kholodil'nykh kompressorov na ikh dolgovechnost']. Chemical and petroleum engineering. 1973. No. 5. Pp. 30–32. (rus)

2. Guo Z., Yuan C., Liu P. Peng Z., Yan X. Study on influence of cylinder liner surface texture on lubrication performance for cylinder liner-piston ring components. Tribology letters. 2013. Vol. 51. Pp. 9–23. doi: 10.1007/s11249-013-0141-y.

3. Taylor C.M. Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability. Wear. 1998. Vol. 221(1). Pp. 1–8. doi: 10.1016/S0043-1648(98)00253-1.

4. Dokshanin S.G., Tynchenko V.S., Bukhtoyarov V.V., Bashmur K.A., Kukartsev V.V. Investigation of the tribological properties of ultrafine diamond-graphite powder as an additive to greases. IOP conference series: materials science and engineering. 2019. Vol. 560. 012192. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012192.

5. Bukhtoyarov V.V., Zyryanov D.K., Bukhtoyarova N.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.V., Bashmur K.A. Expert analysis of elements of the diagnostic system for compressor technological equipment. Journal of physics: conference series. 2019. Vol. 1399. 044113. doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044113.

6. Shneider Yu.G. Operational properties of parts with a regular microrelief [Ekspluatatsionnyye svoystva detaley s regul'yarnym mikrorel'yefom]. L.: Mashinostroyeniye, 1982. 248 p. (rus)

7. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units. *Journal of physics: conference series*. 2019. Vol. 1399. 055032. doi: 10.1088/1742-6596/1399/5/055032.
8. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Fedorenko T.M. Investigation of providing the necessary surface roughness of large-sized rotating parts with attached machine modules [Issledovaniye obespecheniya neobkhodimoy sherokhovatosti povernosti krupnogabaritnykh vrashchayushchikhsya detaley pristavnymi stanochnymi modulyami]. *Bulletin of BGTU named after V. G. Shukhov*. 2008. No. 2. Pp. 35–38. (rus)
9. Sobolev N.I., Titunin B.A. Plastination of machine parts [Plastinirovaniye detaley mashin]. L.: Mashinostroyeniye, 1987. 224 p. (rus)
10. Zhao W., Wang L., Xue Q. Influence of micro/nano-textures and chemical modification on the nanotribological property of Au surface. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*. 2010. Vol. 366(1–3). Pp. 191–196. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.06.006.
11. Liu C., Lu Y.-J., Zhang Y.-F., Li S., Müller N. Numerical study on the lubrication performance of compression ring-cylinder liner system with spherical dimples. *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12(7). e0181574. doi: 10.1371/journal.pone.0181574.
12. Zhang Y., Zeng L., Wu Z., Ding X., Chen K. Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. *Micro & nano letters*. 2019. Vol. 14(4). Pp. 424–429. doi: 10.1049/mnl.2018.5535.
13. Petrovsky D.E., Petrovsky E.A. Rotary tool modules for processing parts of technological machines [Instrumental'nyye rotatsionnyye moduli dlya obrabotki detaley tekhnologicheskikh mashin]. Stary Oskol: TNT, 2017. 196 p. (rus)
14. Zakharov S.M. Hydrodynamic lubrication: state and prospects [Gidrodinamicheskaya smazka: sostoyaniye i perspektivy]. *Friction and wear*. 2010. No. 31(1). Pp. 78–92. (rus)
15. Dotsenko A.I., Buyanovsky I.A. Fundamentals of tribology [Osnovy tribotekhniki]. M.: INFRA-M, 2014. 336 p. (rus)
16. Putintsev S.V. Mechanical losses in reciprocating engines: special design, calculation and testing chapters [Mekhanicheskiye poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nyye glavy konstruirovaniya, rascheta i ispytaniy]. M.: Bauman Moscow State Technical University, 2011. 288 p. (rus)
17. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. Tolerances and landings : part 1. SPb.: Politehnika, 2001. 576 p. (rus)
18. ANSYS Fluent Theory Guide [Electronic resource]. System requirements: Internet browser. URL: <https://www.afs.enea.it/project/nep-tunius/docs/fluent/html/th/node67.htm> (date of treatment 15.06.2022).

Information about the authors

Bashmur, Kirill A. Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Technological Machines and Equipment. E-mail: bashmur@bk.ru. Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodnyy prosp., 82/6.

Petrovsky, Eduard A. Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Oil and Gas Technological Machines and Equipment. E-mail: petrovsky_quality@mail.ru. Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodnyy prosp., 82/6.

Received 28.07.2022

Для цитирования:

Башмур К.А., Петровский Э.А. Технологические возможности ячеистого рельефа для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей технологических агрегатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-99-107

For citation:

Bashmur K.A., Petrovsky E.A. Technological capabilities of cell relief to provide the performance properties of cylindrical surfaces of technological units. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-99-107