

## ЯВЛЕНИЕ ПЫЛЕНИЯ КРАСКИ С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОФСЕТНОЙ ПЕЧАТНОЙ ФОРМЫ

И. Халилов<sup>1\*</sup>, Э. Алиев<sup>1</sup>, Э. Гусейнзаде<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Азербайджанский Технический Университет,

<sup>2</sup>Азербайджанский Государственный Экономический Университет

\*E-mail для переписки: khalilov-isa@rambler.ru

**Получено:** 12 мая 2021; **Принято:** 19 мая 2021

**Цитировать как:** Халилов, И., Алиев, Э., Гусейнзаде, Э. (2021). Явление пыления краски с учетом шероховатости поверхности офсетной печатной формы. *Проблеми охорони праці в Україні*, 37(2), 16–24.

В работе исследовано влияние механики фрикционной печатной пары на пыление краски в печатном процессе, с учетом шероховатости поверхности печатной формы. Целью исследования является определение влияния шероховатости поверхности печатной формы на деформацию декеля, а также на величину суммарного усилия в зоне печатного контакта, относительное передаточное отношение и относительную скорость скольжения декеля по поверхности цилиндра, что непосредственно влияет на пыление краски. Анализом литературных данных по исследованию фрикционной печатной пары установлено, что при исследовании механики печатной пары не учтено влияние микрогеометрии контактирующих поверхностей на исследуемые параметры. Обосновано и установлено влияние микровыступов шероховатости поверхности печатной формы на деформацию декеля в зоне печатного контакта. Для определения внедрения неровностей шероховатости поверхности использована дискретная модель шероховатости представленного в виде набора одинаковых сферических сегментов. Для определения влияния шероховатости поверхности печатной формы на силу трения, возникающей в контактной зоне предложена схема расчета, отличающаяся от аналогов. Разработана методика расчета параметров фрикционной пары в печатном процессе с учетом шероховатости. Получены выражения для определения суммарного момента тангенциальных сил трения на участках скольжения при внедрении сферических неровностей. По предложенной методике приведены соответствующие графические зависимости передаточного числа от разных параметров фрикционной печатной пары. Преимуществами данного исследования по сравнению с аналогами считается то, что при определенных значениях параметров фрикционной пары с учетом шероховатости поверхности печатной формы, также при известных значениях механических характеристик и толщины декеля можно определить изменение длины декеля данного состава, что необходимо в печатном процессе. Предложенная методика расчета, которая ведется без учета давления в зоне печатного контакта, позволяет прогнозировать качество печатных оттисков и количество печатной краски, участвующей в образовании пыления краски, а также правильно настраивать печатную машину перед печатным процессом.

**Ключевые слова:** фрикционная пара, шероховатость, декель, относительное передаточное число, сила трения, контактная зона, деформация, пыление краски.

## THE PHENOMENON OF INK DUSTING TAKING INTO ACCOUNT THE SURFACE ROUGHNESS OFFSET PRINTING PLATE

I. Khalilov<sup>1\*</sup>, E. Aliyev<sup>1</sup>, E. Huseynzade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Azerbaijan Technical University (AzTU),

<sup>2</sup>Azerbaijan State Economic University (UNEC)

\*E-mail for correspondence: khalilov-isa@rambler.ru

**Received:** 12 May 2021; **Accepted:** 19 May 2021

**Cite as:** Khalilov, I., Aliyev, E., Huseynzade, E. (2021). The phenomenon of ink dusting taking into account the surface roughness offset printing plate. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 37(2), 16–24.

The paper investigates the influence of the mechanics of a friction printing pair on ink dusting in the printing process, taking into account the surface roughness of the printing plate. The aim of the study is to determine the influence of the surface roughness of the printing plate on the deformation of the deckle, as well as on the value of the total force in the area of the printed contact, the relative gear ratio and the relative speed of sliding of the deckle along the surface of the cylinder, which directly affects the dusting of the ink. It was found that when studying the mechanics of a printed pair, the influence of the microgeometry of the contacting surfaces on the parameters under study was not taken into account. The influence of microprotrusions of the surface roughness of the printing plate on the deformation of the deckle in the area of the printed contact has been substantiated and established. To determine the introduction of surface roughness irregularities, a discrete roughness model is used, presented as a set of identical spherical segments. To determine the influence of the surface roughness of the printing plate on the friction force arising in the contact zone, a calculation scheme is proposed that differs from analogs. A method is developed for calculating the parameters of a friction pair in the printing process, taking into account the roughness. Expressions are obtained for determining the total moment of tangential friction forces in the sliding sections when spherical irregularities are introduced. According to the proposed technique, the corresponding graphical dependences of the gear ratio on different parameters of the friction printed pair are shown. The advantages of this study in comparison with analogs are that at certain values of the parameters of the friction pair, taking into account the surface roughness of the printing plate, also at known values of the mechanical characteristics and thickness of the deckle, it is possible to determine the change in the length of the deckle of a given composition, which is necessary in the printing process. The proposed calculation method, which is carried out without taking into account the pressure in the printed contact zone, allows predicting the quality of printed impressions and the amount of ink involved in the formation of ink dusting, as well as correctly adjusting the printing press before the printing process.

**Key words:** friction pair, roughness, deckle, relative gear ratio, friction force, contact zone, deformation, ink dusting

## 1. Постановка проблеми и анализ последних исследований и публикаций

Красочный аппарат офсетной машины формирует слой краски необходимой толщины для последующей передачи его на печатную форму. Для этого краска подается из красочного ящика, раскатывается и накачивается на печатную форму.

При раскатывании краски валиками в результате разрыва красочного слоя всегда образуются красочные нити-«тяжи». Если эти нити очень длинны и когезия краски незначительна, то возникает пыление краски. Эта пыль, отрываясь от валиков, заряжается статическим электричеством и устойчиво удерживается в воздухе в виде мельчайших капелек тумана, разносится потоком воздуха по всему цеху и даже попадает в смежные помещения, что отрицательно сказывается на здоровье и безопасности работающего персонала. Наличие пыления краски приводит и к снижению качества печати.

Как отмечают авторы [1] одним из факторов, влияющих на уровень пыления, является шероховатость поверхности валиков.

Известно, что при печати отгисков под давлением происходит деформация упругого декеля в зоне печатного контакта, что влияет на пыление. Из-за цилиндрической формы контактирующих поверхностей декели в контактной зоне деформируются в основном в радиальном и тангенциальном направлениях. Соотношение и величины обоих видов деформаций зависят от свойств материала декелей, геометрических параметров печатной пары и её привода, а также от типа привода, который может быть принудительным или фрикционным. Исследование влияния геометрических параметров печатной пары, а также шероховатости ее поверхности на качество отгисков и на пыление – актуальная задача.

В работе [2] исследована механика печатной пары фрикционным и принудительным приводами. Определены относительное передаточное число, суммарное усилие в зоне печатного контакта, относительное перемещение офсетного цилиндра и формного цилиндра, с учетом деформации резиново-тканевого полотна. Опытным путем установлено, что при прокатывании валика без деформаций его упругого декеля длина красочной полоски за один оборот не отличается от длины окружности  $c = 2\pi R$ , недеформированного валика. А при прокатывании валика с нажимом, который вследствие действия силы  $p$  вызывает деформацию  $\lambda$  она возрастает на величину  $\Delta$ . Это увеличение длины красочной полоски свидетельствует об увеличении длины окружности валика при одновременном его качении и деформировании.

В работе [3] модель отношения между параметрами валика, скоростью, давлением и толщиной слоя краски в зазоре валиков была установлена с использованием теории контакта Герца. Было проанализировано влияние скорости, давления и размера валика на толщину краски в зазорах валиков. Влияние скорости печати на характеристики краски было проанализировано с использованием метода компьютерного моделирования. Однако в данной работе при проведении исследований не была учтена шероховатость поверхности печатной формы.

В работе [4] экспериментальные результаты представлены для ряда красок на подложках различной макрошероховатости. Модель и данные показывают, что наличие макрошероховатости субстрата всегда приводит к недооценке микрошероховатости.

В исследованиях, представленных в [5], показано, что большинство образцов с неравномерным поглощением воды / влаги и неравномерной отражательной способностью к выгоранию имели тенденцию к более

серьезным проблемам печати, связанным с поверхностной влажностью / водой. Однако при исследовании связи влажности с печатными пятнами не учтена микрогеометрия поверхности печатной формы.

В исследовании [6] обсуждается механизм образования дефектов в системе с обратной офсетной печатью, работающей на высокой скорости. Систематическое исследование показало, что на размер и плотность дефектов существенное влияние оказывали скорость печати, вдавливание и свойства материала. Однако при исследовании не учтено влияние геометрических параметров поверхности печатной формы на размер и плотность дефектов.

Целью работы [7] является предложение математической формулы, описывающей распределение температуры в красочном блоке офсетной печатной машины, вызванное явлением трения между цилиндрами, которые остаются в контакте. В статье приведен анализ коэффициента теплового распределения для цилиндрических слоев без учета параметров печатной формы.

Одним из наиболее важных критериев качества печати является контроль уровня точечного усиления. Предложенный в статье [8] метод калибровки  $CtP$ , используемый для изготовления печатной формы, калибрует усиление точки в соответствии с рекомендациями ISO 12647-2: 2013 полностью автоматически параллельно печати. Однако в предложенном методе калибровки  $CtP$  не учтены микрогеометрические свойства печатной формы.

В исследовании, представленном в [9], установлено, что большинство образцов с неравномерным поглощением влаги и неравномерной отражательной способностью к выгоранию, как правило, имеют более серьезные проблемы с печатью, связанные с поверхностной влажностью. Для определения характеристик использовалась водная технология окрашивания неоднородности поглощения без учета шероховатости поверхности печатной формы.

В статье [10] механизм печати и производительность технологии высокоточной печатной схемы со смещением исследуются с точки зрения основных параметров печати посредством экспериментального и теоретического анализа. Результаты расчетов сравниваются с результатами эксперимента. Однако при проведении расчетов и экспериментов не была учтена шероховатость поверхности печатной формы.

В [11] установлено, что в рамках стандартизации процесса офсетной печати одной из важнейших задач является правильный выбор компонентов системы печати с учетом особенностей их взаимодействия и поведения в процессе печати. С этой целью разработан программный продукт для расчета переноса краски на печатный материал между контактирующими цилиндрическими поверхностями листового офсетного печатающего устройства с границами деформации. Но при расчете переноса краски на печатный материал между контактирующими цилиндрическими поверхностями не учитывалась шероховатость поверхности печатной формы.

В [12] показана возможность создания локальных областей отрыва краски от поверхности бумаги при выходе из зоны зацепления печати. Численные расчеты движения свободных границ были исследованы для различных значений вязкости с помощью перемещения граничных узлов на линиях узлов на фиксированной сетке без учета шероховатости поверхности печатной формы.

В статье [13] приведены результаты экспериментального испытания нарушения адгезии краски на бумаге с покрытием. Обнаружено, что нарушение адгезии краски привело к появлению белых пятен без краски на бумаге. Но при переносе краски на печатный

материал между контактирующими поверхностями не учтена шероховатость поверхности печатной формы.

В статье [14] с применением метода конечных элементов рассматривалась деформация вала при офсетной печати, а также влияние этой деформации на качество печати без учета микрогеометрии контактирующих поверхностей.

В работе [15] определена сила трения в печатной контактной зоне с учетом шероховатости поверхности печатной формы. Однако в вышеуказанных работах не определены относительное передаточное число, суммарное усилие в зоне печатного контакта, относительная скорость скольжения декеля, относительное перемещение офсетного цилиндра и формного цилиндра учитывая деформацию резинотканевого полотна с учетом шероховатости поверхности печатной формы.

В [16] решена задача фрикционного взаимодействия двухслойного упругого тела и шероховатого индентора, которое соответствует явлениям, протекающим в зоне печатного контакта. Задача решалась с помощью исследования периодической контактной задачи, на основе которой определяется функция дополнительного смещения, обусловленная влиянием микронеровностей. Задачу с известными граничными условиями, разделяют на две взаимосвязанные задачи о контакте на микро- и макроуровнях:

$$W(x, y) = C[P(x, y)] + A[P(x, y)]. \quad (1)$$

Здесь  $P(x, y)$  – неизвестное номинальное давление,  $C[P(x, y)]$  – функция дополнительного смещения, зависящий от номинального давления. Это функция определяется в результате решения задачи о множественном контакте на микроуровне при отсутствии шероховатостей  $C[P(x, y)] \equiv 0$  и задача сводится к контактной задаче, коротко описанной как  $W(x, y) = A[P(x, y)]$ . Функция  $C[P(x, y)]$  зависит от параметров микрогеометрии.

Исходя из вышеизложенного, можно прийти к выводу, что при исследовании печатной пары, конкретно – деформации декеля в контактной зоне, необходимо учитывать шероховатость более жесткой поверхности, т.е. шероховатость поверхности печатной формы. Это, в свою очередь, позволит получить более точные значения фрикционного взаимодействия офсетного и формного цилиндров. Для прогнозирования влияния параметров фрикционного взаимодействия на количество печатной краски, участвующей в образовании «красочного пыления», проводилось исследование с учетом шероховатости поверхности печатной формы.

### 1. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование влияния механики фрикционной печатной пары на пыление краски в печатном процессе, с учетом шероховатости поверхности печатной формы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- определить схему взаимодействия упругого декеля и шероховатой печатной формы и обосновать влияние шероховатости поверхности печатной формы на механику печатной пары с фрикционным приводом;

- выявить механику печатной пары с фрикционным приводом с учетом шероховатости поверхности печатной формы;

- разработать методику оценки подбора взаимодействующих цилиндров печатной пары с учетом микрогеометрии поверхности печатной формы.

## 2. Обоснование влияния шероховатости поверхности печатной формы на деформацию декеля

При наличии сил трения фрикционное взаимодействие как физический процесс включает в себя ряд факторов, таких как изнашивание, фрикционный разогрев, адгезионное взаимодействие. При этом взаимодействующие тела часто бывают неоднородными, а их поверхности всегда являются шероховатыми. В печатном процессе элементы печатной пары соответствуют вышеуказанным свойствам. Другим важным фактором фрикционного контакта является наличие шероховатости взаимодействующих поверхностей.

Известно, что при расчетах контактных характеристик шероховатых поверхностей часто используются модели Гринвуда-Вильямсона, Н. Б. Демкина и их последователей. Однако применение таких моделей для решения некоторых контактных задач приводит к значительным погрешностям. Поэтому для описаний некоторых видов контакта требуется модель шероховатой поверхности, адекватно описывающая реальную поверхность. Для расчета перечисленных выше контактных характеристик широко применяется дискретная модель шероховатости в виде набора сферических сегментов, распределение которых по высоте соответствует кривой опорной поверхности шероховатого слоя.

Для определения внедрения микровыступов шероховатой поверхности воспользуемся дискретной моделью шероховатости, приведенной в [17]. Согласно [18] неровности представим в виде набора одинаковых сферических сегментов радиусом  $R = a_c^2 / (2\omega R_{\max})$ , основанием  $a_c$  высотой  $\omega R_{\max}$ . Для описания кривой опорной поверхности авторами [18] использована регуляризованная неполная бета-функция:

$$\eta(c) = \frac{B_\varepsilon(p, q)}{B(p, q)}, \quad (2)$$

где  $B_\varepsilon(p, q)$ ,  $B(p, q)$  – соответственно неполная и полная бета-функция; плотность функции распределения неровностей по высоте описывается выражением:

$$\varphi_n(u) = \frac{u^{p-2} (1-u)^{q-2} [(p-1)(1-u)(q-1)u]}{\varepsilon_s^{p-1} (1-\varepsilon_s)^{q-1}}, \quad (3)$$

где  $p$  и  $q$  – параметры бета-функции, которые определяются высотными параметрами шероховатости;

$$p = \left( \frac{R_p}{R_q} \right)^2 \left( \frac{R_{\max} - R_p}{R_{\max}} \right) - \frac{R_p}{R_{\max}}; q = p \left( \frac{R_{\max}}{R_p} - 1 \right);$$

$$\varepsilon_s = \frac{P}{(p+q)}; \omega = 1 - \varepsilon_s; \omega = 0, 2 \dots 0, 6.$$

В работе [18] для  $i$ -ой неровности шероховатой поверхности величина внедрения определена формулой (4):

$$h_i = (\varepsilon - u) R_{\max}, \quad (4)$$

относительное внедрение определено формулой (5):

$$\frac{h_i}{R} = \frac{(\varepsilon - u) \cdot 2\omega R_{\max}^2}{a_c^2} = \left( \frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right) \cdot \left( \frac{2\omega R_{\max}}{a_c} \right)^2 \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – относительное сближение – исходное расстояние до вершины  $i$ -ой неровности. Число вершин в слое  $du$ :

$$dn_r = n_c \varphi_n'(u) du, n_c = \frac{A_c}{\pi a_c} \quad (6)$$

где  $n_c$  – число сфер;  $A_c$  – контурная площадь контакта.

## 3. Определение нагрузки ведомого вала при проскальзывании рабочих поверхностей контактирующих цилиндров фрикционной пары с учетом шероховатости поверхности печатной формы.

В работе [2] показано, что кроме изменения длины  $L_E$  для фрикционной пары также характерно проскальзывание рабочих поверхностей контактирующих цилиндров. Указывается, что это проскальзывание можно разделить на два вида, т.е. буксование, причиной которого является превышение передаваемого парой момента сил полезных и вредных сопротивлений, возникающих при вращении ведомого цилиндра над моментом тангенциальных сил трения. Эта сила создается в результате сжатия цилиндра по линии их контакта, также упругое скольжение, вызываемое несовпадением по ширине полосы контакта, скоростей ведомого  $E$  и ведущего  $H$  цилиндров (рис. 1, [20]) вследствие деформации их поверхностей в контактной зоне.

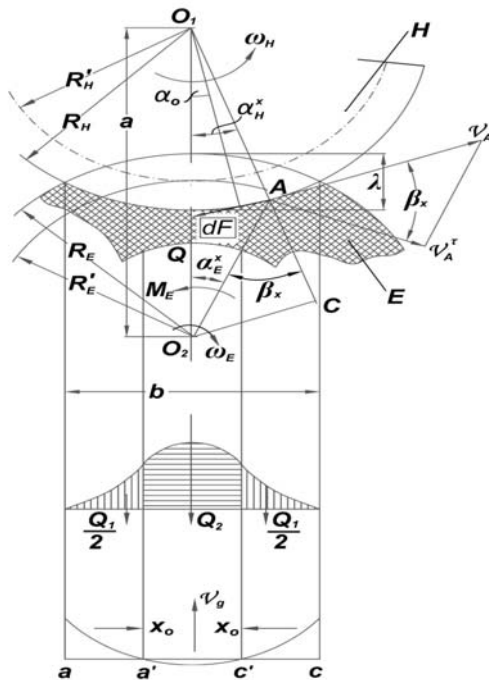


Рисунок 1 – Расчетная схема и графики изменения параметров фрикционной пары

Отмечается, что в полосе контакта по ее краям имеется два участка скольжения и в средней части один участок сцепления, на которых относительные скорости  $V_q$  скольжения поверхностей цилиндров  $E$  и  $H$  направлены в противоположные стороны. Соотношение между величинами этих участков влияет на передаточное отношение фрикционной пары и зависит от степени нагрузки ведомого цилиндра.

Для определения границ  $x_o$  участков автором [20] составлено условие равновесия цилиндра  $E$  в период установившегося движения

$$M_f = M_f^* - M_f' = 2 \left( \int_0^{x_0} dM_f dx - \int_{x_0}^{\frac{b}{2}} dM_f dx \right) = M_E \quad (7)$$

где  $M_f$  суммарный момент тангенциальных сил трения  $dF$  на участках скольжения ( $M_f'$ ) и сцепления ( $M_f^*$ );  $dM_f$  – момент элементарной силы трения  $dF$ .

$$dM_f = dF \cdot AC; dF = fdQ; AC = R_E - \lambda,$$

где  $Q$  – суммарное усилие в зоне печатного контакта на участках скольжения ( $Q_1$ ) и сцепления ( $Q_2$ );  $M_E$  – суммарный момент, приложенный к валу, максимальное значение которого определяется формулой

$$M_E^{\max} = Qf (R_E - \lambda), \quad (8)$$

где  $Qf = F_f$  – тангенциальная сила трения.

Известно [20], что поверхности реальных тел имеют отклонения от своей номинальной формы. В измеряемые диаметры эластичного и жесткого цилиндров также входит высота микронеровностей, которые влияют на деформацию декеля.

В общем случае под влиянием нагрузок происходит сближение между поверхностями контактирующих тел и в зонах фактического касания происходит внедрение микронеровностей поверхности печатной формы в тело декеля. При этом печатная форма считается твердым, а декедь упругим материалом.

Для определения влияния шероховатости поверхности печатной формы на силу трения, возникающей в печатной контактной зоне, воспользуемся схемой [15], которая показана на рис. 2.

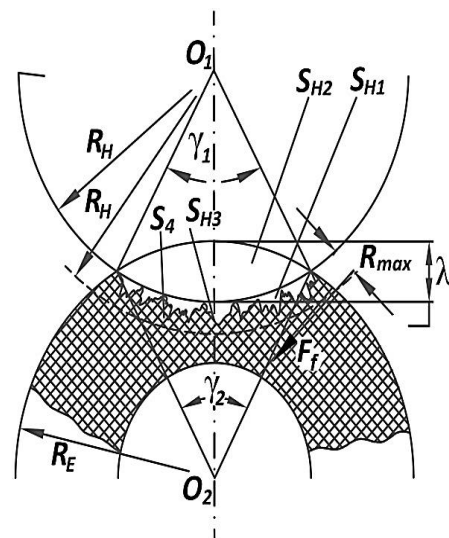


Рисунок 2 – Схема расчета силы трения, которая возникает на фрикционной печатной паре, с учетом шероховатости поверхности печатной формы

Учитывая свойства офсетного печатного процесса можно сказать, что для получения качественных оттисков, т.е. для воспроизведения всех микроштриховых элементов, имеющихся на печатной форме, необходимо создание упругого насыщенного контакта между печатным и офсетным цилиндрами.

При возникновении упругого насыщенного контакта, когда имеет место взаимное влияние контактных зон, общую силу трения определим в следующем виде [21]

$$F_f = \sum_{i=1}^{n_{ave}} F_{fi} \Delta n_i, \quad (9)$$

где  $n_{ave}$  – число микронеровностей, имеющих среднюю величину внедрения

$$F_f = F_{fave} \cdot n_{ave}, \quad (10)$$

где  $F_{fave}$  – сила трения, которая возникает при скольжении некоторой условной микронеровности, имеющей среднюю величину внедрения  $h_{ave}$ .

По данным [21], общую силу трения запишем

$$F_{fave} = \frac{0,25\alpha_{hys} \cdot E h_{ave}^2}{1 - \mu^2} + \left( \tau_o + \frac{0,4\beta E}{1 - \mu^2} \sqrt{\frac{h_{ave}}{R}} \right) \pi R h_{ave} \quad (11)$$

$$F_f = \left[ \tau_o + \frac{0,4E}{1 - \mu^2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{ave} h_{max}}{R}} \right] \frac{A_c \varepsilon_{ave}}{2} +$$

$$+ \frac{0,125\alpha_{hys} \cdot A_c \cdot b \varepsilon_{ave}^{\nu-1} \cdot \nu E h_{max} \sqrt{\varepsilon_{ave}}}{\pi R (1 - \mu^2)} \quad (12)$$

При этом нормальная сила определяется формулой

$$P = \frac{0,2 A_c E}{1 - \mu^2} \sqrt{\frac{b \cdot h_{max} \varepsilon_{ave}^2}{R}}, \quad (13)$$

а коэффициент трения

$$P = \frac{0,2 A_c E}{1 - \mu^2} \sqrt{\frac{b \cdot h_{max} \varepsilon_{ave}^2}{R}}, f_f = \frac{2,4 \tau_o (1 - \mu^2)}{E} \sqrt{\frac{R}{h_{ave}}} + \beta + 0,2 \alpha_{hys} \left( \frac{h_{ave}}{2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

где  $E$  – модуль упругости деформируемого материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона этого материала;  $\alpha_{hys}$  – коэффициент гистерезисных потерь материала в условиях сложного напряженного состояния;  $h_{ave}$  – средняя величина внедрения микронеровности;  $h_{max}$  – максимальная величина внедрения микронеровности;  $\varepsilon_{ave}$  – среднее относительное сближение между поверхностями взаимодействующих твердых тел;  $b$  и  $\nu$  – параметры кривой опорной поверхности;  $A_c$  – контурная площадь контакта;  $\tau_o$  и  $\beta$  – фрикционные характеристики, зависящие от условий трущихся пар;  $R$  – радиус кривизны микронеровности.

Контурная площадь по данным [18] определяется формулой (15)

$$A_c = n_c \pi a_c^2. \quad (15)$$

В работе [22] для определения глубины  $h_c$  рекомендуется определить фактическую площадь контакта при внедрении, которая определяется формулой

$$A_r = 2 \pi R h c^2, \quad (16)$$

где  $h$  – величина внедрения

$$c^2 = \frac{h_c}{h}, \quad (17)$$

где  $h_c$  – глубина, по которой происходит контакт сферы с материалом декеля. Учитывая (16) и (17), формулу расчета радиусов  $R$  сферических сегментов (15) запишем в виде

$$A_c = \frac{A_r \cdot n_c \cdot \omega \cdot R_{max}}{h_c}; \quad (18)$$

так же известно [22], что

$$A_r = \frac{V}{h} \quad (19)$$

где  $V$  – деформированный объем материала декеля под шероховатым слоем.

Учитывая (19), формулу (18) запишем в виде

$$A_c = \frac{V \cdot n_c \cdot \omega \cdot R_{max}}{h \cdot h_c}. \quad (20)$$

Для определения деформированного объема материала декеля под шероховатым слоем по схеме (рис. 2) введем следующие обозначения:

$S_{H1}$  – площадь сектора контактной зоны, соответствующей центральному углу  $\gamma_1$  с учетом шероховатости поверхности печатной формы;

$S_{H2}$  – площадь сектора контактной зоны, соответствующей центральному углу  $\gamma_1$  без учета шероховатости поверхности печатной формы;

$S_{H3}$  – площадь под шероховатым слоем печатной формы, входящим в сектор контактной зоны соответствующей центральному углу  $\gamma_1$ ;

$S_4$  – площадь свободного пространства от шероховатого слоя печатной формы, которая соответствует площади деформированного слоя декеля под шероховатым слоем, входящим в сектор контактной зоны соответствующей центральному углу  $\gamma_1$ .

Определим обозначенные площади:

$$S_{H1} = \frac{\pi R_H'^2}{360^\circ} \gamma_1; S_{H2} = \frac{\pi R_H''^2}{360^\circ} \gamma_1 \quad (21)$$

Если учесть, что  $R_H'' = R_H' - R_{max}$ , то

$$S_{H2} = \frac{\pi (R_H' - R_{max})^2}{360^\circ} \gamma_1. \quad (22)$$

Площадь под шероховатым слоем поверхности печатной формы в базовой длине, в которой определяются параметры шероховатости, запишем в виде

$$S_{H3}' = \int_0^l y(x) dx, \quad (23)$$

где  $y(x)$  – функция, описывающая шероховатость поверхности;  $l$  – базовая длина.

Если учесть то, что длина дуги  $l_q$  – сектора контактной зоны соответствующей центральному углу  $\gamma_1$

$l_q = \frac{\pi R_H'}{180^\circ} \gamma_1$  и число воспроизведений  $n$  базовой длины  $l$

в длине дуги  $l_q$ ,  $n = \frac{l}{l_q}$  или же  $n = \frac{\pi R_H'}{l \cdot 180^\circ} \gamma_1$  то  $S_{H3}$

определим как:

$$S_{H3} = n S_{H3}' = \frac{\pi R_H'}{l \cdot 180^\circ} \gamma_1 \int_0^l y(x) dx. \quad (24)$$

Учитывая, что среднее арифметическое значение шероховатости  $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx$ , то (24) запишем в виде

$$S_{H3} = \frac{\pi R_H'}{180^\circ} \gamma_1 \cdot R_a. \quad (25)$$

Определим площади свободного пространства от шероховатого слоя.

$$S_4 = S_{H1} - S_{H2} - S_{H3} \quad (26)$$

Учитывая (21), (22) и (25), выражение (26) запишем в виде

$$S_4 = \frac{\pi R_H'}{180^\circ} \gamma_1 \left[ \frac{R_{max} (2R_H' - R_{max})}{2R_H'} - R_a \right]. \quad (27)$$

Определим деформированный объем декеля под шероховатым слоем печатной формы в виде

$$V = S_4 \cdot L, \quad (28)$$

где  $L$  – длина контакта по образующей контактирующих цилиндров.

Учитывая (27), формулу (28) запишем в виде

$$V = \frac{\pi R_H' L}{180^\circ} \gamma_1 \left[ \frac{R_{max} (2R_H' - R_{max})}{2R_H'} - R_a \right] \quad (29)$$

Теперь с учетом (29) формулу (20) запишем в виде

$$A_c = \frac{\pi R_H' L \cdot \gamma_1 \cdot n_c \cdot \omega \cdot R_{max} \left[ \frac{R_{max} (2R_H' - R_{max})}{2R_H'} - R_a \right]}{h \cdot h_c \cdot 180^\circ}. \quad (30)$$

Учитывая (30), формулы (12) и (13) запишем в виде

$$F_f = \frac{\pi \cdot L \cdot \gamma_1 \cdot n_c \cdot \omega \cdot R_{max} \left[ \frac{R_{max} (2R_H' - R_{max})}{2R_H'} - 2R_H' - R_a \right]}{2 \cdot h \cdot h_c \cdot 180^\circ} \times \left\{ \left[ \tau_o + \frac{0,4E}{1 - \mu^2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{ave} h_{max}}{R}} \right] \frac{\varepsilon_{ave}}{2} + \frac{0,125\alpha_{hys} \cdot b \cdot \varepsilon_{ave}^{\nu-1} \cdot E \cdot h_{max} \sqrt{\varepsilon_{ave}}}{\pi R (1 - \mu^2)} \right\} \quad (31)$$

$$0,2 \cdot E \cdot \pi \cdot L \cdot \gamma_1 \cdot n_c \cdot \omega \cdot R_{\max} \left[ R_{\max} (2R'_H - R_{\max}) - 2R'_H - R_a \right] \times \\ \frac{1}{2 \cdot h \cdot h_c \cdot 180^\circ (1 - \mu^2)} \times \\ \times \sqrt{\frac{b \cdot h_{\max} \cdot \varepsilon_{\text{ave}}^2}{R}} \quad (32)$$

Учитывая (6) и (31), формулу (8) запишем в виде

$$M_E^{\max} = \frac{\pi \cdot L \cdot \gamma_1 \cdot n_c \cdot \omega \cdot R_{\max} \left[ R_{\max} (2R'_H - R_{\max}) - 2R'_H - R_a \right] \times \\ \times \left\{ \tau_0 + \frac{0,4E}{1 - \mu^2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{ave}} h_{\max}}{R}} \right\} \frac{\varepsilon_{\text{ave}}}{2} + \frac{0,125 \alpha_{\text{Hys}} \cdot b \cdot \varepsilon_{\text{ave}}^{y-1} \cdot E \cdot h_{\max} \sqrt{\varepsilon_{\text{ave}}}}{\pi R (1 - \mu^2)} \left. \right\} \times \\ \times \left\{ R_E - \left[ \lambda + (\varepsilon - u) R_{\max} \cdot \varphi'_n(u) du \right] \right\}, \quad (33)$$

где  $M_E^{\max}$  – наибольшая величина момента  $M_E$  вычисляется из условия [2]  $Q = Q_2$ , т.е.  $Q_1 = 0$ ;  $e = 1$ ;

$$e_0 = m_0 Q_1,$$

где  $e = \frac{2}{b} x_0$  и  $e_0 = \frac{m_0}{2} (K_m + 1)$  (34)

$$K_m = \frac{M_E}{M_E^{\max}}; \quad b \text{ – ширина контакта } b = 2 \sqrt{\frac{2R_E \cdot R_H \cdot \lambda}{R_E + R_H}},$$

$m_0$  – величина, которая зависит от постоянного значения  $m$ , применяемых для декельных материалов: обычно [2]  $m = 0,3-0,65$ , а  $m_0 = 0,44-0,58$ . Зная величину  $e_0$ , по данным [2] можно найти значения  $e$ , определяющие границы  $x_0 = 0,5e \cdot b$ .

Так как в точках  $x_0$  силы трения изменяют свое направление, относительная скорость скольжения  $V_q$  рабочих поверхностей цилиндров  $E$  и  $H$  в них равна нулю. Во всех остальных точках контактной зоны величина  $V_q$  отлична от нуля и зависит от параметров  $\alpha_H^x$  и  $a$  (рис. 1).

Из-за непостоянства абсолютной скорости декеля  $V_A$  в произвольной точке  $A$  контактной зоны при постоянной окружной скорости  $V_H$  цилиндра  $H$  между  $V_A$  и  $V_H$  возникает разность (схема рис. 1)

$$V_g = V_A - V_H.$$

По данным [2]

$$V_g = V_H \left( i - \frac{1 + a_0^2 - 2a_0 \cos \alpha_H^x}{a_0 \cos \alpha_H^x - 1} \right), \quad (35)$$

где  $i$  – передаточное отношение фрикционной пары.

$$i = \frac{\omega_E}{\omega_H} = \frac{R_E'}{R_H'} \quad (36)$$

где  $\omega_E$ ,  $\omega_H$  – угловые скорости цилиндров  $E$  и  $H$ ,

$R_E'$ ,  $R_H'$  – радиусы центроидных окружностей цилиндров  $E$  и  $H$ , обкатывающихся без проскальзывания;  $a_0$  – относительное межцентровое расстояние

$$a_0 = \frac{a}{R_H} = \frac{R_E' + R_H'}{R_H} = \frac{R_E + R_H - \lambda}{R_H}. \quad (37)$$

Учитывая (30), (4) и (6), формулу (37) запишем в виде

$$a_0 = \frac{R_E + R_H - \left[ \lambda + (\varepsilon - u) R_{\max} \varphi'_n(u) du \right]}{R_H}. \quad (38)$$

При  $\alpha_H^x = a_0 \approx \sin a_0 = \frac{x_0}{R_H} v_g = 0$ . Приравнявая

выражение (35) нулю определим

$$i = \frac{a_0 \cos a_0 - 1}{1 + a_0^2 - 2a_0 \cos a_0}. \quad (39)$$

Результаты исследований показывают, что шероховатость поверхности печатной формы, а также внедрение ее микронеровностей в тело декеля приводит к уменьшению расстояния между центрами цилиндров и относительного межцентрового расстояния соответственно. Также уменьшается максимальный момент и увеличивается относительное передаточное число, что обеспечивает высокое качество печати и минимальное значение пыления.

## 6. Обсуждение результатов исследования

В результате исследований установлены влияние микрогеометрии поверхности печатной формы на деформацию декеля и при этом определены величины относительного передаточного числа, суммарного усилия и силы трения в зоне печатного контакта, относительной скорости скольжения декеля по поверхности цилиндра. Для исследования влияния микрогеометрии на деформацию декеля учтено углубление микровыступов шероховатости поверхности печатной формы, которые приводят к дополнительным смещениям и деформации декеля в том числе. По предложенной методике рассчитаны деформация декеля, значения передаточного числа, суммарного усилия и силы трения с учетом шероховатости поверхности печатной формы. Для проведения исследований и произведения расчетов выбрана офсетная печатная машина *Rapida KBA 105*, имеющая следующие параметры печатной пары:  $R_E = 14,68 \text{ см}$ ;  $R_H = 14,94 \text{ см}$  – радиусы эластичного и жесткого валов соответственно. Толщина декеля марки *CONTI – AIR – 3,1mm*; толщина металлической печатной формы марки *PRO – V* фирмы *Fujifilm* –  $\delta_F = 0,3 \text{ мм}$ ;  $R_{\max} = 2,19 \text{ мкм}$ ,  $R_p = 1,56 \text{ мкм}$ ,  $R_a = 0,317 \text{ мкм}$  – параметры шероховатости поверхности печатной формы, определенные по профилограмме, снятой профилометром мод. 130;  $\lambda = 0,2 \text{ мм}$  – деформация декеля;  $m_0 = 0,5$  и  $m = 0,4$  [2].

Определена ширина контактной зоны по известной формуле  $b_1 = 3,463 \text{ см}$  с учетом шероховатости и  $b_2 = 3,461 \text{ см}$  без учета шероховатости поверхности печатной формы; по формулам (37) и (38) находим  $a_0' = 1,999$  с учетом и  $a_0'' = 2$  без учета шероховатости; по формуле (34) определяем значения,  $e_0 = f(k_m) = 0,25(k_m + 1)$ , также по формуле (39)  $i = f(e)$ ,  $i = \frac{0,99 - 0,01331e^2}{0,98022 + 0,02662e^2}$  – с учетом шероховатости и  $i = \frac{1 - 0,01338e^2}{1 + 0,02676e^2}$  – без учета шероховатости поверхности печатной формы, при  $\cos \alpha_0 = 1 - \frac{\alpha_0^2}{2}$ ;  $\alpha_0 = e \frac{b}{2R_H}$ . По расчетным данным исследований построены графики зависимостей  $e_0 = f(k_m)$ ,  $i = f(e)$ ,  $e_0 = f(e, m)$ , которые показаны на рис. 3.

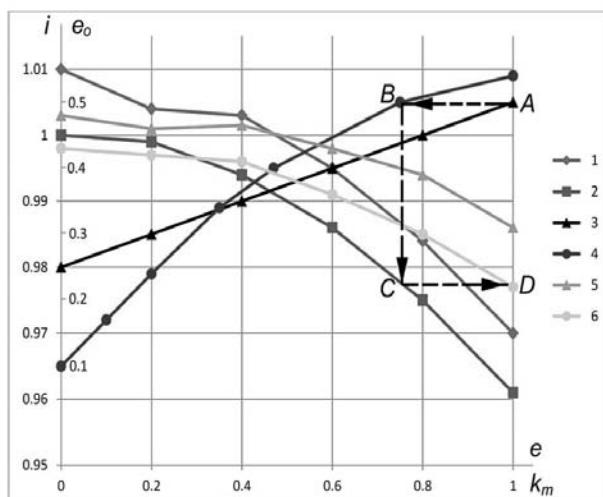


Рисунок – 3 Результати досліджень впливу шорховатості поверхні печатної форми на механіку фрикційної печатної пари:

- 1 – графік залежності  $i = f(e)$ , з урахуванням шорховатості
- 2 – графік залежності  $i = f(e)$ , без урахування шорховатості поверхні печатної форми;
- 3 – графік залежності  $e_0 = f(K_m)$ ;
- 4 – графік залежності  $e_0 = f(e)$ ;
- 5 – графік залежності  $i = f(K_m)$  – з урахуванням шорховатості
- 6 – графік залежності  $i = f(K_m)$  – без урахування шорховатості поверхні печатної форми.

С допомогою графіків відомих функцій  $e_0 = f(k_m)$ ,  $i = f(e)$ ,  $e_0 = f(e, m)$ , по відомій методиці побудована крива залежності  $i = f(K_m)$ , где при  $K_m = 0; 0,5; 1$   $i = 1,002$ ;  $i = 0,999$ ;  $i = 0,986$  – с урахуванням шорховатості и  $i = 0,998$ ;  $i = 0,995$ ;  $i = 0,978$  – без урахування шорховатості поверхні печатної форми.

После чего с помощью этих же графиков строим кривую зависимости  $i = f(k_m)$  по точкам  $A, B, C, D$ , которые определены по схеме в такой последовательности:

$$A(k_m = 1) \rightarrow B(e_0 = 0,5) \rightarrow C(e = 0,75) \rightarrow D(i = 0,978).$$

В скобках указаны значения величин  $e_0$ ,  $e$  и  $i$  при  $K_m = 1$ .

В графиках зависимостей  $i = f(e)$  и  $i = f(K_m)$ , (определение передаточного числа с учетом шорховатости) резко снижение кривых в начале, объясняется начальным износом микрогеометрии поверхности печатной формы после пуска печатной машины. На этом этапе прогнозируется максимальное количество печатной краски участвующей в образовании красочного пыления.

Графики зависимости  $V_g = f(e)$  можно построить по уравнению (35), которое после подстановки  $\alpha = f(e, b, R)$  и преобразования при заданных значениях  $e_0$ ,  $b$  и  $R$  принимает вид

$$V_g = V_H \left( i \frac{0,9802 + 0,02662e^2}{0,99 - 0,01331e^2} - 1 \right) \quad - \text{ с учетом}$$

шероховатости и

$$V_g = V_H \left( i \frac{1 + 0,02676e^2}{1 - 0,01338e^2} - 1 \right) \quad - \text{ без учета шероховатости}$$

поверхности печатной формы.

Из-за большого объема представленной в работе информации расчеты и графики указанных зависимостей не приведены.

Преимуществами данного исследования по сравнению с аналогичными можно считать то, что зная параметры печатной пары, механические характеристики и микрогеометрию поверхности печатной формы, деформацию и толщину декаля можно определить изменение длины декаля данного состава. Также по этим данным определяется сила трения, суммарный момент, приложенный к валу эластичного цилиндра, коэффициент трения и суммарное усилие в зоне печатного контакта.

Вычисление этих параметров позволяет определить передаточное отношение фрикционной пары и относительной скорости скольжения, что дает возможность прогнозировать количество печатной краски, участвующей в образовании красочного пыления.

По предложенной методике расчеты ведутся без учета давления в зоне печатного контакта. Эта методика расчета позволяет прогнозировать качество печатных оттисков и количество печатной краски, участвующей в образовании красочного пыления, а также правильно настраивать печатную машину перед печатным процессом, учитывая и безопасность работающего персонала.

## Выводы

1. Обосновано влияние шероховатости поверхности печатной формы на деформацию декаля.
2. Предложена схема углубления микровыступов шероховатости поверхности печатной формы.
3. Теоретически установлено, что увеличение шероховатости приводит к увеличению, а уменьшение шероховатости поверхности печатной формы – к уменьшению ширины зоны печатного контакта. Также установлено, что относительное межцентровое расстояние  $\alpha_{\text{ж}}$  имеет меньшие значения при учете шероховатости, что обеспечивает минимальное значение красочного пыления.
4. Использование результатов исследований позволяют при регулировании печатной машины установить оптимальные значения технологических параметров печатного процесса, что необходимо для обеспечения качества оттисков и минимизации красочного пыления с учетом минимизации вредного влияния пыления на здоровье работающего персонала.

## Выражение благодарности.

Авторы благодарны администрации университетов, которые они представляют, за предоставленную возможность проведения исследования.

## Конфликт интересов

Ни у кого из авторов нет потенциальных конфликтов интересов, связанных с этим исследованием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Варепо Л. Г., Паничкин А. В., Бобров В. И. Расщепление краски на выходе из зоны печатного контакта. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013. Вып. 3. 189–194.
2. Тюрин А. А. Печатные машины, автоматы. Москва: Книга, 1980. 416 с.

3. Liu, LL (Liu, Linlin), Li, KK (Li, Kaikai), Lu, F (Lu, Fei). Dynamic Simulation Modeling of Inking System Based on Elastohydrodynamic Lubrication. *International journal of heat and technology*. Vol. 34, No. 1, March, 2016, 124–128. <https://doi.org/10.18280/ijht.340118>
4. Elton, N. J. Optical measurement of microroughness of pigment coatings on rough substrates. *Measurement science and technology*. Vol: 20. No: 2. 2009. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/025303>.
5. Thorman, S., Strom, G., Gane, PAC. Impact of non-uniform water absorption on water-interference print mottle in offset printing. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. Vol: 33. No:1. 2018. 150–163. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-3011>.
6. Kusaka, Y., Mizukami, M., Yamaguchi, T., Fukuda, N., Ushijima, H. Patterning defects in high-speed reverse offset printing: lessons from contact dynamics. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol: 29. No:4. 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab024b>.
7. Pyr'yev, Y. Analytical solution of thermal conduction in a two-layer cylinder modeling oscillator roller in an offset machine. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol: 136. 2019. 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.004>.
8. Hauck, S., Gooran, S. Automated calibration system in an offset printing workflow. *Journal of Print and Media Technology Research*. Vol: 7. No: 3. 2018. 115–125. <https://doi.org/10.14622/JPMTR-1808>.
9. Thorman, S., Strom, G., Gane, PAC. Impact of non-uniform water absorption on water-interference print mottle in offset printing. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. Vol: 33. No: 1. 150–163. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-3011>.
10. Cheng, H.C., Chen, Y.W., Chen, W.H., Lu, S.T., Lin, S.M. Assessing Ink Transfer Performance of Gravure-Offset Fine-Line Circuitry Printing. *Journal of Electronic Materials*. Vol: 47, No: 3. 2018. 1832–1846. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5967-x>.
11. Varepo, L. G., Trapeznikova, O. V., Panichkin, A. V., Roev, B. A., Kulikov, G. B. Software for Quantitative Estimation of Coefficients of Ink Transfer on the Printed Substrate in Offset Printing. Metrology, Standardization, Quality: Theory and Practice, (MSQ-2017) International Scientific and Technical Conference on Metrology, Standardization, Quality–Theory and Practice (MSQ) Omsk, Russia Nov 14–16, 2017 Vol. 998. 2018. UNSP 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/998/1/012041>.
12. Panichkin, A. V., Varepo, L. G. The Numerical Calculation of the a Viscous Incompressible Fluid Transfer onto Porous Surface Between Rotating Cylinders. 1st International Multidisciplinary Microscopy Congress (INTERM). Springer Proceedings in Physics. Antalya, TURKEY. Vol: 154. Oct. 10–13, 2013. 79–83. 2014. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04639-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04639-6_11)
13. Alm, H. K., Strom, G., Schoelkopf, J., Gane, P. Ink-lift-off during offset printing: a novel mechanism behind ink-paper coating adhesion failure. *Journal of Adhesion Science and Technology*. Vol: 29. No: 5. Mar. 4. 2015. 370–391. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.989650>.
14. Kwangsoo Kim, Chung Hwan Kim, Heon-Yeoung Kim and Dong-Soo Kim. Effects of blanket roller deformation on Printing qualities in gravure-offset printing method. Published 20 may 2010. *The Japan Society of Applied Physics Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, Numbers 5S1.
15. Халилов И. А., Алиев Э. А., Гусейнзаде Э. М. Влияние шероховатости поверхности печатной формы на силы трения в контактной зоне. *АзТУ. Научные труды*. Том 1, № 4. Баку, 2015. 33–36.
16. Горская Е. В. Моделирование фрикционного взаимодействия шероховатого индентора и двухслойного упругого полупространства. *Физическая мезомеханика*, 2012, Т. 15, № 2, 31–36.
17. Огар П. М., Горохов Д. Б., Кожевников А. С. Контактные задачи в герметологии неподвижных соединений. Братск: Изд-во БрГУ, 2007. 242 с.
18. Огар П. М., Елсуков В. К., Угрюмова Е. В. Относительная площадь контакта при внедрении и сплющивании сферических неровностей шероховатых поверхностей. *Системы Методы Технологии*. 2018. 1 (37). 12–17.
19. Горохов Д. Б., Кожевников А. С. Плотность зазоров при контактировании жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 4 (48). 2015. 74–79.
20. Тир К. В. Фрикционное вращение жесткого цилиндра с тонкой упруго-эластичной крышкой. *Полиграфия и издательское дело*. Львов, 1964, вып. 1.
21. Контактное вращение твердых тел. Механизм формирования фактической площади касания. Насыщенный и ненасыщенный контакты. URL: [Studfiles.net/preview/578934/page:5/](http://Studfiles.net/preview/578934/page:5/)
22. Hemot X., Barrier O., Bekouch Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. 43. 4136–4153.

## REFERENCES

1. Varepo L. G., Panichkin A. V., Bobrov V. I. Rasshcheplenie kraski na vykhode iz zony pechatnogo kontakta. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2013. Vyp. 3. 189–194.
2. Tyurin A. A. *Pечатные машины, автоматы*. Москва: Книга, 1980. 416 с.
3. Liu, LL (Liu, Linlin), Li, KK (Li, Kaikai), Lu, F (Lu, Fei). Dynamic Simulation Modeling of Inking System Based on Elastohydrodynamic Lubrication. *International journal of heat and technology*. Vol. 34, No. 1, March, 2016, 124–128. <https://doi.org/10.18280/ijht.340118>
4. Elton, N. J. Optical measurement of microroughness of pigment coatings on rough substrates. *Measurement science and technology*. Vol: 20. No: 2. 2009. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/025303>.
5. Thorman, S., Strom, G., Gane, PAC. Impact of non-uniform water absorption on water-interference print mottle in offset printing. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. Vol: 33. No:1. 2018. 150–163. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-3011>.
6. Kusaka, Y., Mizukami, M., Yamaguchi, T., Fukuda, N., Ushijima, H. Patterning defects in high-speed reverse offset printing: lessons from contact dynamics. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol: 29. No:4. 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab024b>.
7. Pyr'yev, Y. Analytical solution of thermal conduction in a two-layer cylinder modeling oscillator roller in an offset machine. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol: 136. 2019. 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.004>.
8. Hauck, S., Gooran, S. Automated calibration system in an offset printing workflow. *Journal of Print and Media Technology Research*. Vol: 7. No: 3. 2018. 115–125. <https://doi.org/10.14622/JPMTR-1808>.
9. Thorman, S., Strom, G., Gane, PAC. Impact of non-uniform water absorption on water-interference print mottle in offset printing. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. Vol: 33. No: 1. 150–163. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-3011>.



10. Cheng, H.C., Chen, Y.W., Chen, W.H., Lu, S.T., Lin, S.M. Assessing Ink Transfer Performance of Gravure-Offset Fine-Line Circuitry Printing. *Journal of Electronic Materials*. Vol: 47, No: 3. 2018. 1832–1846. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5967-x>.
11. Varepo, L. G., Trapeznikova, O. V., Panichkin, A. V., Roev, B. A., Kulikov, G. B. Software for Quantitative Estimation of Coefficients of Ink Transfer on the Printed Substrate in Offset Printing. Metrology, Standardization, Quality: Theory and Practice, (MSQ-2017) International Scientific and Technical Conference on Metrology, Standardization, Quality–Theory and Practice (MSQ) Omsk, Russia Nov 14–16, 2017 Vol. 998. 2018. UNSP 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/998/1/012041>.
12. Panichkin, A. V., Varepo, L. G. The Numerical Calculation of the a Viscous Incompressible Fluid Transfer onto Porous Surface Between Rotating Cylinders. 1st International Multidisciplinary Microscopy Congress (INTERM). Springer Proceedings in Physics. Antalya, TURKEY. Vol: 154. Oct. 10–13, 2013. 79–83. 2014. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04639-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04639-6_11)
13. Alm, H. K., Strom, G., Schoelkopf, J., Gane, P. Ink-lift-off during offset printing: a novel mechanism behind ink-paper coating adhesion failure. *Journal of Adhesion Science and Technology*. Vol: 29. No: 5. Mar. 4. 2015. 370–391. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.989650>.
14. Kwangsoo Kim, Chung Hwan Kim, Heon-Yeoung Kim and Dong-Soo Kim. Effects of blanket roller deformation on Printing qualities in gravure-offset printing method. Published 20 may 2010. *The Japan Society of Applied Physics Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, Numbers 5S1.
15. Khalilov I. A., Aliev E. A., Guseinzade E. M. Vliianie sherokhovatosti poverkhnosti pechatnoi formy na sily treniia v kontaktnoi zone. AzTU. Nauchnye trudy. Tom 1, № 4. Baku, 2015. 33–36.
16. Torskaya E. V. Modelirovanie friktsionnogo vzaimodeistviya sherokhovatogo indentora i dvukhsloinogo uprugogo poluprostranstva. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2012, T. 15, № 2, 31–36.
17. Ogar P. M., Gorokhov D. B., Kozhevnikov A. S. Kontaktnye zadachi v germetologii nepodviznykh soedinenii. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2007. 242 s.
18. Ogar P. M., Elsukov V. K., Ugriumova E. V. Otnositelnaia ploshchad kontakta pri vnedrenii i spliushchivanii sfericheskikh nerovnostei sherokhovatykh poverkhnostei. *Sistemy Metody Tekhnologii*. 2018. 1 (37). 12–17.
19. Gorokhov D. B., Kozhevnikov A. S. Plotnost zazorov pri kontaktirovanii zhestkoi sherokhovatoi poverkhnosti cherez sloi uprugoplasticheskogo pokrytiia Sovremennye tekhnologii. *Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 4 (48). 2015. 74–79.
20. Tir K. V. Friktsionnoe vrashchenie zhestkogo tsilindra s tonkoi uprug-elastichnoi pokryshkoi. *Poligrafya i izdatelskoe delo*. Lvov, 1964, vyp. 1.
21. Kontaktirovanie tverdyykh tel. Mekhanizm formirovaniya fakticheskoi ploshchadi kasaniya. *Nasyshchennyi i nenasyshchennyi kontakty*. URL: <http://studfiles.net/preview/578934/page:5/>
22. Hemot X., Barrier O., Bekouch Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. 43. 4136–4153.

**І. Халілов, Е. Алієв, Е. Гусейнзаде**

#### **ЯВИЩЕ ПИЛІННЯ ФАРБИ З УРАХУВАННЯМ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ОФСЕТНОЇ ДРУКАРСЬКОЇ ФОРМИ**

У роботі досліджено вплив механіки фрикційної друкарської пари на фарбове пиління в друкарському процесі з урахуванням шорсткості поверхні друкарської форми. Метою дослідження є визначення впливу шорсткості поверхні друкарської форми на деформацію декеля, а також на величину сумарного зусилля в зоні друкарського контакту, відносно передаточне відношення та відносну швидкість ковзання декеля по поверхні циліндра, що безпосередньо впливає на фарбове пиління. Аналізом літературних даних стосовно дослідження фрикційної друкарської пари встановлено, що при дослідженні механіки друкарської пари не враховано вплив мікрогеометрії контактуючих поверхонь на досліджувані параметри. Обґрунтовано і встановлено вплив мікроступів шорсткості поверхні друкарської форми на деформацію декеля в зоні друкарського контакту. Для визначення впровадження нерівностей шорсткості поверхні використано дискретну модель шорсткості, представлену у вигляді набору однакових сферичних сегментів. Для визначення впливу шорсткості поверхні друкарської форми на силу тертя, що виникає в контактній зоні, запропоновано схему розрахунку, що відрізняється від аналогів. Розроблено методику розрахунку параметрів фрикційної пари в друкарському процесі з урахуванням шорсткості. Отримано вирази для визначення сумарного моменту тангенціальних сил тертя на ділянках ковзання при впровадженні сферичних нерівностей. За запропонованою методикою наведені відповідні графічні залежності передавального числа від різних параметрів фрикційної друкарської пари. Перевагами цього дослідження у порівнянні з аналогами вважається те, що при певних значеннях параметрів фрикційної пари з урахуванням шорсткості поверхні друкарської форми, а також при відомих значеннях механічних характеристик і товщини декеля можна визначити зміну довжини декеля даного складу, що необхідно в друкарському процесі. Запропонована методика розрахунку, яка ведеться без урахування тиску в зоні друкарського контакту, дозволяє прогнозувати якість надрукованих відбитків і кількість друкарської фарби, яка бере участь в утворенні фарбового пиління, а також правильно налаштувати друкарську машину перед друкарським процесом.

**Ключові слова:** фрикційна пара, шорсткість, декель, відносне передавальне число, сила тертя, контактна зона, деформація, фарбове пиління.