

Научная статья

УДК 67.017: 539.43

doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48

## Анализ особенностей механики контакта бандажа и опорных роликов вращающихся печей

Константин Васильевич Макаренко<sup>1</sup>, д.т.н.  
Александр Александрович Азаркин<sup>2</sup>, аспирант  
Александр Викторович Вдовин<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1,3</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>2</sup> Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> makkon1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

<sup>2</sup> jarret@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-9170-4114>

<sup>3</sup> vdovin.alexander.v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6014-0043>

**Аннотация.** Изложены основы конструкции вращающихся печей, широко используемых при переработке и подготовке различного сырья и материалов. Показано, что слабым местом конструкции вращающихся печей являются опорные ролики, которые несут всю нагрузку печи и изначально изготовлены из менее прочной стали, чем контактирующий с ними бандаж. Фактически в самой конструкции заложена возможность периодической замены «расходной части» – опорного ролика. Однако для промышленника любой простой оборудования приводит к экономическим потерям. Поэтому была сформулирована цель: повысить долговечность опорных роликов без существенного изменения конструкции печи. Для этого первоначально, с позиции контактной механики, были изучены основы взаимодействия поверхностей опорного ролика и бандажа вращающейся печи. Приведены расчетные модели для различных вариантов контактирования этих деталей. Изучена силовая модель контакта поверхностей опорного ролика и бандажа. Определены максимальные нормальные и касательные напряжения в зоне контакта, на его границе и за ее пределами. При этом в зоне контакта поверхностей ролика и бандажа происходят сложные процессы, в частности, микропроскальзывание и скольжение, что обусловлено различием в диаметрах вращающихся тел и разницей в уровне их механических свойств. Микропроскальзывание является одним из источников фреттинг-коррозии. Однако наиболее существенный износ происходит в результате механического взаимодействия и изменения структуры поверхностного слоя с постепенным накоплением в нем различного рода дефектов кристаллического строения, обусловленных пластическим деформированием поверхностного слоя контактирующих деталей. Показано, что существенное влияние на процесс изнашивания опорных роликов оказывают не только механические и эксплуатационные свойства материала, из которого они изготовлены, но и смещения пятна контакта при работе печи. Смещение может быть угловым или линейным, а в реальных условиях чаще всего комбинированным, оно обусловлено температурным расширением / сжатием металла конструкции и условиями работы вращающейся печи.

**Ключевые слова:** вращающиеся печи, опорные ролики, бандаж, пятно контакта, износ, пластическая деформация, поверхностный слой

**Для цитирования:** Макаренко К.В., Азаркин А.А., Вдовин А.В. Анализ особенностей механики контакта бандажа и опорных роликов вращающихся печей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48

## Analysis of contact mechanics of a bandage and support rolls of rotary kilns

Konstantin V. Makarenko<sup>1</sup>, D. Eng.

Alexander A. Azarkin<sup>2</sup>, PhD student

Alexander V. Vdovin<sup>3</sup>, PhD Eng.

<sup>1,3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>2</sup> Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> makkon1@yandex.ru

<sup>2</sup> jarret@mail.ru

<sup>3</sup> vdovin.alexander.v@yandex.ru

**Abstract.** The basics of the design of rotary kilns, widely used in the processing and preparation of various raw materials, are described. It is shown that the weak point of the rotary kilns design is the support rollers, which carry the entire load of the kiln and are initially made of less durable steel than a bandage being in contact with them. In fact, the design itself provides for the possibility of periodic replacement of the «miscellaneous part», which is a support roller. However, for an operator, any downtime of equipment leads to economic losses. Therefore, the goal has been formulated: to increase the durability of the support rollers avoiding a significant change in the kiln design. For this purpose, initially, from the point of view of contact mechanics, the basics of the interaction of the surfaces of the support roller and the bandage of a rotary kiln have been studied. Calculation models for various contact options of these parts have been given. The force model of contact between the surfaces of the support roller and the bandage has been studied. The maximum normal and tangential stresses in the contact zone, at its boundary and beyond have been determined. At the same time, complex processes occur in the contact area of the roller and the bandage surfaces, in particular, micro-slipping and sliding, due to the difference in the diameters of the rotating bodies and the difference in the level of their mechanical properties. Micro-slip is one of the sources of fretting wear. However, the most significant wear occurs as a result of mechanical interaction and changes in the structure of the surface layer with the gradual accumulation of various kinds of defects in the crystalline structure caused by plastic deformation of the surface layer of the contacting parts. It is shown that not only the mechanical and operational properties of the material for their construction, but also the displacement of the contact spot during kiln operation have a significant effect on the wear process of the support rollers. The displacement can be angular or linear, and in real conditions it is most often combined, it is caused by the thermal expansion / compression of the metal structure and the operating conditions of the rotary kiln.

**Keywords:** rotary kilns, support rollers, bandage, contact spot, wear, plastic deformation, surface layer

**For citation:** Makarenko K.V., Azarkin A.A., Vdovin A.V. Analysis of contact mechanics of a bandage and support rolls of rotary kilns / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48

### Введение

Для дальнейшего использования многие сыпучие материалы (цемент, фосфаты, оксиды кальция и алюминия, сульфиды и т. д.) должны подвергаться дополнительной обработке – обжигу, сушке, прокаливанию, спеканию, кальцинации и т.д. Самым эффективным оборудованием являются вращающиеся печи, отличающиеся простотой конструкции [1, 2]. Сырьё загружают в сушильный барабан (рис. 1), на который насажены кольца-обечайки – металлические бандажы, которые опираются на специальные вращающиеся ролики. Вращение осуществляется электродвигателем через редуктор, шестерню и зубчатый венец,

закрепленный на корпусе барабана [2]. Барабан располагается под небольшим углом ( $7...12^\circ$ ), что позволяет сырью перемещаться внутри под действием своего веса. Обладая внушительными размерами (диаметр 3 м, длина 25 м), сушильный барабан может перемещаться в осевом направлении, что может привести к сходу его с опорных роликов, для предотвращения которого используются упорные ролики. Эти ролики выполняют одновременно контрольную и страхующую функции: в нормальном состоянии упорные ролики не вращаются, в случае предаварийной ситуации ролики начинают вращаться и предотвращают барабан от дальнейшего смещения.

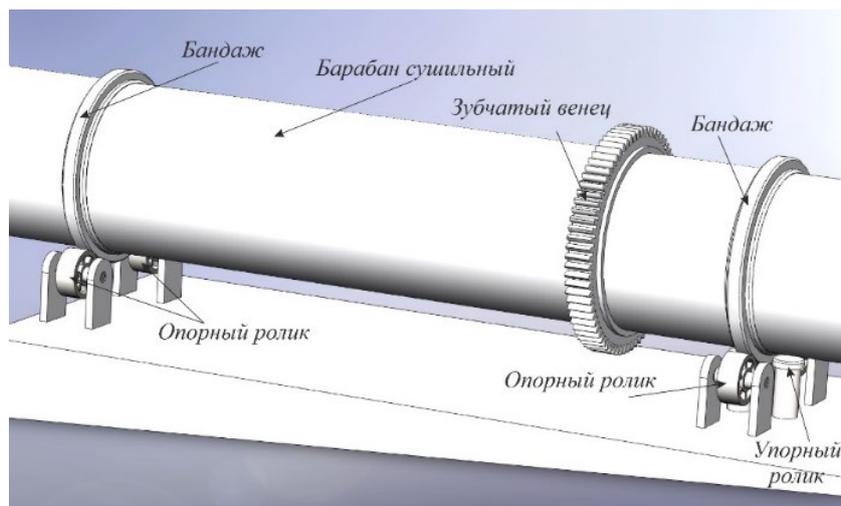


Рис. 1. Упрощенная схема вращающейся печи

Fig. 1. Simplified diagram of a rotary furnace

Слабым местом конструкции являются опорные ролики, которые, обладая меньшей твердостью по сравнению с бандажом, являются, по сути, «расходным материалом». Но ввиду высокой металлоёмкости (диаметр 800 мм, ширина 350 мм) цена их значительна. Поэтому перед производством стоит задача по увеличению срока службы опорных роликов без ущерба для долговечности бандажа.

Целью представленной работы является исследование процессов достижения предельного состояния опорными роликами с позиции механики контактного взаимодействия и определение влияния условий работы на их долговечность.

Несмотря на кажущуюся очевидность процессов, приводящих к достижению предельного состояния опорного ролика, изучим более детально данный вопрос с позиции механики контактного взаимодействия [4]. Бандаж барабана и опорный ролик представляют собой упругие цилиндрические тела (рис. 2, а), отличающиеся по диаметру (3000 мм и 800 мм) и ширине (200 мм и 350 мм), при перекачивании которых в условиях силового взаимодействия, зоны контактирующих поверхностей качения в определенный момент времени формируют поверхность давления или пятно контакта [5].

При общем подходе задача качения рассматривается для контакта двух осесимметричных упругих тел, одно из которых является опорным роликом 1, а второе бандажом 2

(рис. 2). При геометрически идеальном расположении тела прижаты друг к другу по линии контакта и вдоль общей нормали  $z$  к их поверхности действует сила  $P$ , определяемая весом вращающейся печи. Оба тела вращаются относительно собственных осей I и II с угловыми скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , соответственно. При идеализированном подходе в случае свободного качения и симметрии тел относительно их осей вращения, силы взаимодействия между ними не изменяются в процессе вращения печи, в этом случае пятно контакта должно иметь постоянную форму. В соответствии с теорией Герца для упругого взаимодействия пятно контакта будет иметь форму полосы с шириной  $2b$ , которую можно определить по уравнению [12]:

$$b = 1,6 \left[ \frac{P \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{L \left( \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $P$  – нормальная сила;  $L$  – длина полосы контакта, для упругого взаимодействия равная ширине бандажа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона (сейчас и далее, для материала: 1 – опорного ролика и 2 – бандажа);  $E$  – модуль Юнга;  $D$  – диаметр.

Максимальное напряжение сжатия для системы взаимодействия двух соосных цилиндрических тел, определяют по уравнению [12]:

$$\sigma_{сж(max)} = 0,798 \left[ \frac{P}{L} \frac{\left( \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)}{\left( \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Как следует из уравнений (1) и (2) для заданных геометрии и свойств материалов контактное давление и вызванные им напряжения возрастают прямо пропорционально линейному размеру области контакта.

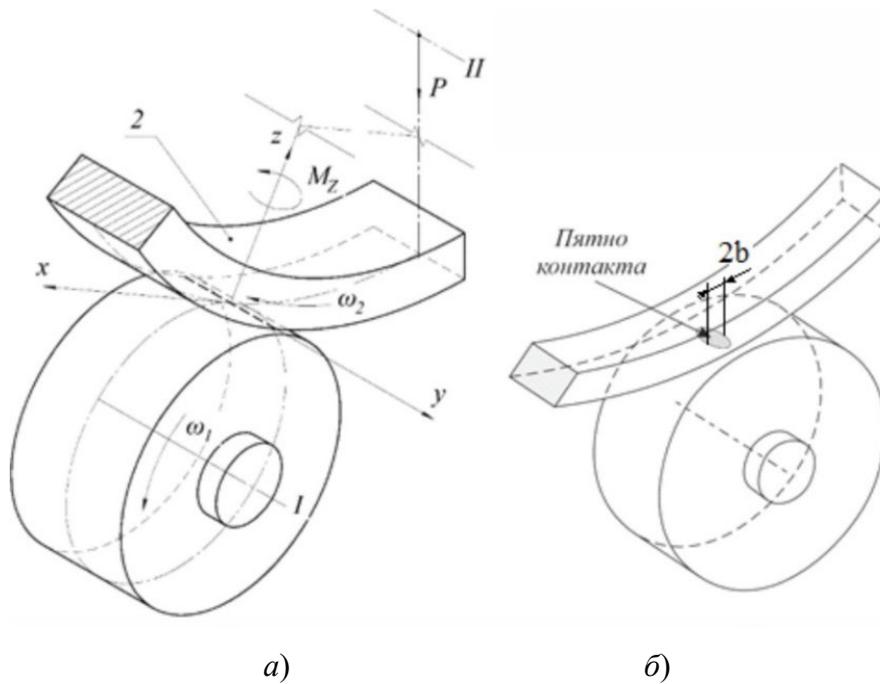


Рис. 2. Схемы контакта поверхностей банджа и опорного ролика:

*a* – силового взаимодействия; *б* – формирование пятна контакта при упругопластическом взаимодействии

Fig. 2. Contact schemes of the surfaces of the bandage and the support roller:

*a* – force interaction; *b* – formation of a contact spot under elastoplastic interaction

Распределение давления по площади контакта и напряжений в зоне контакта вдоль линии взаимодействия двух цилиндров (опорного ролика и банджа) представлено на рис. 3. При качении наиболее нагружены несколько участков: во-первых, непосредственно под поверхностью максимальных значений достигают касательные напряжения; во-вторых, на самой поверхности имеются два участка, представленные максимальным давлением в пределах пятка контакта и максимальные растягивающие напряжения, выходящие за зону контакта [15].

Как следует из анализа распределения касательных напряжений их максимальное

значение соответствует глубине  $0,78b$  [13]. При работе в зоне контакта поверхностей опорного ролика и банджа наиболее нагруженной оказывается центральная часть дорожки качения. При этом наиболее существенное влияние на процесс изнашивания поверхности опорного ролика оказывают растягивающие напряжения, возникающие на границе пятна контакта. При этом, учитывая циклический характер нагружения поверхностей контакта при работе печи, в пределах сформировавшейся дорожки качения по всем участкам материала последовательно проходят и растягивающие и сжимающие напряжения.

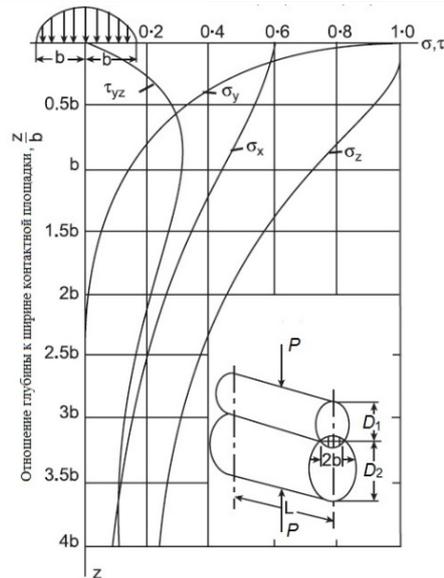


Рис. 3. Распределение нормальных  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  и касательных  $\tau_{yz}$  напряжений вдоль оси  $z$  в глубину материала от поверхности контакта опорного ролика с бандажом [12]

Fig. 3. Distribution of normal  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  and tangential  $\tau_{yz}$  stresses along the  $z$  axis into the depth of the material from the contact surface of the support roller with a bandage [12]

Смоделировал условия контакта между двумя цилиндрическим упругими телами К. Джонсон в своей классической работе [4]. Деформации возникают на контактирующих поверхностях опорного ролика и бандажа при приложении нормальной силы  $P$ ,

обусловленной весом ее конструкции и материалом в нее загруженным (рис. 4). При взаимном сжатии точки в материалах контактирующих деталей I и II смещаются на расстояния  $\delta_1$  и  $\delta_2$  вдоль оси  $z$  по направлению к точке  $O$ .

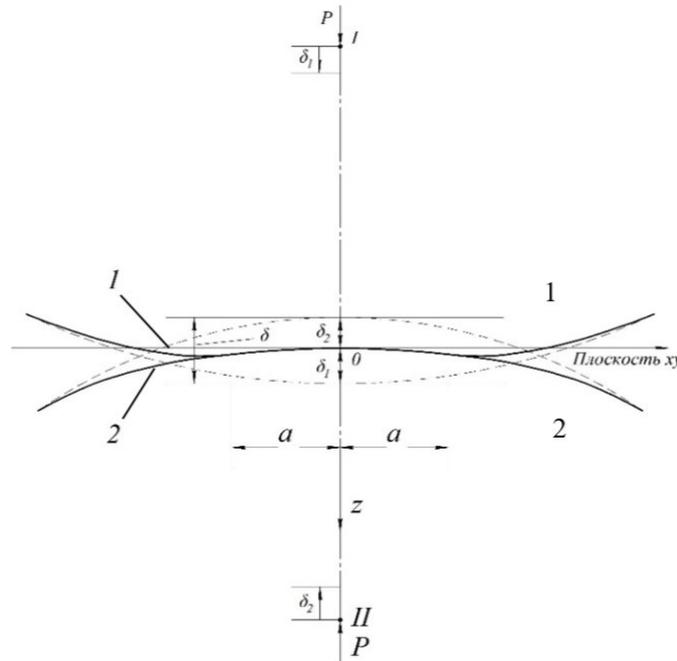


Рис. 4. Герцевский контакт двух цилиндрических тел, для случая взаимодействия поверхностей опорного ролика и бандажа: 1 – недеформированные поверхности; 2 – деформированные поверхности

Fig. 4. Hertz contact of two cylindrical bodies, for the case of interaction of the surfaces of the support roller and the bandage: 1 – undeformed surfaces; 2 – deformed surfaces

В действительности, т. к. материалы тел 1 и 2 изначально отличаются по свойствам, то дифференциальный параметр, предложенный К. Джонсоном [4, 5] будет иметь вид:

$$\frac{K}{G} = \frac{\frac{1 - 2\nu_2}{G_2} - \frac{1 - 2\nu_1}{G_1}}{4} \neq 0, \quad (3)$$

где  $G$  – модуль упругости.

В области контакта возможно проскальзывание по причине разности тангенциальных деформаций на контактирующих поверхностях, имеющих различные упругие свойства.

Следующей особенностью контакта бандажа и опорных роликов является то, что радиусы поверхностей опорного ролика и бандажа различны  $R_1 < R_2$ , поэтому на поверхностях давления возникают касательные силы, вызывающие микропроскальзывание точек тел в областях, прилегающих к внешнему контуру пятна контакта. При этом в контактной задаче взаимодействия двух упругих цилиндрических тел различают процессы микропроскальзывания и скольжения.

Скольжение в отличие от микропроскальзывания представляет собой разность скоростей точек абсолютно твердых тел. Так как при работе вращающихся печей угловые скорости  $\omega_1 \neq \omega_2$  качение тел будет сопровождаться дополнительно верчением. Относительные скольжения тел вдоль осей  $x$  и  $y$  называют продольным и поперечным крипом соответственно, а верчение относительно оси  $z$  – спином ( $M_z$ ). О. Рейнольдс [6] обнаружил, что зона контакта разбивается на зону сцепления и микропроскальзывания, которые зависят от сил трения и упругих и / или пластических деформаций. Микропроскальзывание, возникающее при контакте поверхностей опорного ролика и бандажа, является одним из источников фреттинг-коррозии – формы повреждения поверхностей контакта, проявляющееся в результате специфического трения двух поверхностей друг о друга [14].

По внешнему виду роликов (рис. 5), эксплуатирующихся достаточно продолжительное время можно сделать вывод, что есть отличие в особенностях работы каждой пары роликов.

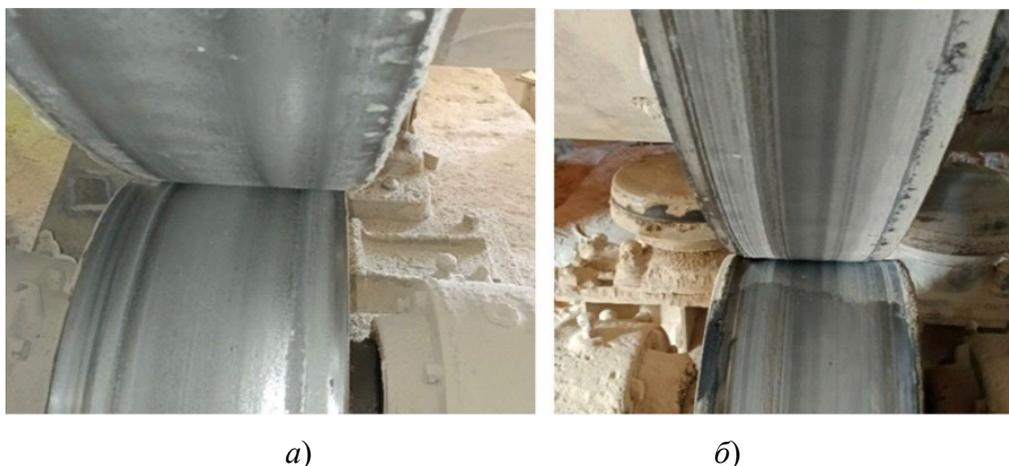


Рис. 5. Расположение бандажа на поверхности верхней пары (а) и нижней пары (б) опорных роликов

Fig. 5. The location of the bandage on the surface of the upper pair (a) and the lower pair (b) of the support rollers

На поверхности верхних роликов бандаж смещается ближе к центру тяжести барабана, постепенно «сползая» с края. На поверхности нижних роликов – бандаж поворачивается, как бы «врезаясь» в их поверхность: ближе к центру тяжести барабана канавка глубже. Причины такого расположения бандажа на опорных роликах в следующем: в

процессе эксплуатации происходит провисание центра сушильного барабана под действием силы тяжести (рис. 6), что приводит к нарушению соосности бандажа и верхней пары роликов (но при этом оси остаются в одной плоскости). Так как барабан расположен под углом – соосность нижней пары роликов и бандажа изменяется не так значительно.

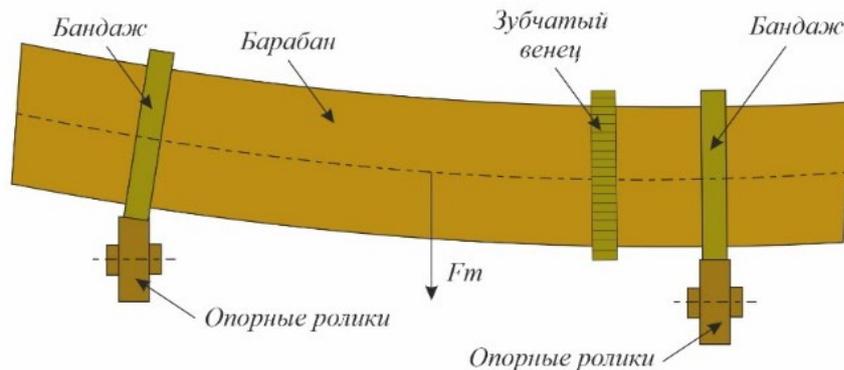


Рис. 6. Изгиб барабана

Fig. 6. Bending of the drum

Такое расположение бандажей приводит к изменению пятна контакта (рис. 7), что влечет за собой перераспределение усилий и смещение площадки контактного

взаимодействия. Наибольшее усилие сместится на боковые части опорных роликов, расположенные к центру барабана.

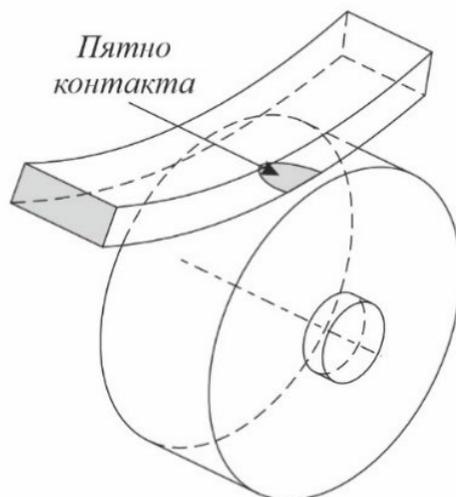


Рис. 7. Схема контакта поверхностей бандажа и опорного ролика с учетом изгиба барабана

Fig. 7. Contact diagram of the surfaces of the bandage and the support roller, taking into account the bending of the drum

В результате бандаж будет деформировать верхний опорный ролик, образуя своеобразный «козырёк» (рис. 8, а), который направлен к центру тяжести барабана. Для нижней пары роликов бандаж, расположенный практически по центру опорного ролика, будет деформировать его поверхность немного иначе, перераспределение усилий приводит к образованию дорожки качения или «жёлоба», более

глубокая часть которого направлена к центру тяжести барабана (рис. 8, б).

На основании проведенного анализа можно рекомендовать: для избежания образования дефекта типа «козырек» на поверхности опорных роликов, упрочнять методами термобработки или наплавки боковую «не рабочую» поверхность опорного ролика.



Рис. 8. Результат деформации верхнего (а) и нижнего (б) опорных роликов

Fig. 8. The result of deformation of the upper (a) and lower (b) support rollers

При этом что важно, даже расположенные на одном уровне опорные ролики в процессе работы вращающейся печи нагружены крайне неравномерно. Теоретическое распределение сил на опорные ролики при использовании расчетов на прочность узлов печи показано на рис. 9. Однако в процессе работы масса загруженного материала, подвергающегося сушке в печи, за счет ее вращения смещается в

одну сторону (рис. 9, б), что приводит к перераспределению нагрузки на поверхность опорного ролика. В реальном производстве наиболее быстро предельного состояния достигает наиболее сильно нагруженный один ролик в нижней паре, однако при проведении ремонтных работ приходится одновременно заменять пару опорных роликов, что экономически не целесообразно.

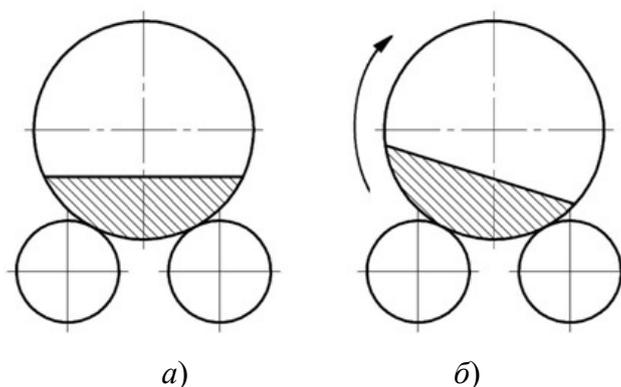


Рис. 9. Учет влияния нагрузки от обрабатываемого материала в силовых схемах расчета вращающихся печей [13]:

а – в теоретических расчетах большинства работ [1 – 3]; б – в реальном производстве с учетом вращения печи в процессе ее работы

Fig. 9. Taking into account the influence of the load from the processed material in the power calculation schemes of rotary furnaces [13]:

а – in theoretical calculations of most works [1 – 3]; б – in real production, taking into account the rotation of the furnace during its operation

Существенное влияние на процесс изнашивания опорных роликов оказывают не только механические и эксплуатационные свойства материала, из которого они изготовлены, но и смещения пятна контакта при работе печи. Смещение может быть угловым или линейным, а чаще всего комбинированным,

оно обусловлено температурным расширением / сжатием металла конструкции печи, и в свою очередь определяется температурными условиями работы печи, суточными и сезонными температурными колебаниями [11]. Кроме этого, элементы печи подвержены циклическим воздействиям, обусловленным

вращением корпуса печи и работой механизма привода, что также приводит к отклонениям при контакте поверхностей опорных роликов и бандажа.

Однако наиболее существенный вклад в изнашивание поверхности опорных роликов вносит процесс изнашивания отслаиванием, проявляющейся в виде отделения тонких чешуек или пластинок (рис. 10) охрупченного

материала, и питтинг, представляющий собой образование «язвочек» углублений при выкрашивании локальных, микроскопических участков на поверхности в пределах дорожки качения [15]. Процесс изнашивания по данному механизму обусловлен накоплением дислокаций при пластической деформации поверхности контактирующих деталей.



Рис. 10. Поверхность бандажа с отслоившимися частицами материала опорного ролика

Fig. 10. The surface of the bandage with detached particles of the support roller material

В итоге поверхностные слои металлов в пятне контакта подвергаются не только деформациям, но и механическому трению, которое в условиях цеховой запыленности и влажности усугубляется дополнительно абразивным и водородным изнашиванием. Таким образом, в процессе работы печи рабочие поверхности опорных роликов подвергаются сложному, комбинированному воздействию различных негативных факторов, приводящих к реализации разнообразных процессов износа, что оказывает существенное влияние на достижение

предельного состояния опорных роликов вращающихся печей.

### Выводы

Расчеты вращающихся печей ведут исходя из предположения, что соприкосновение происходит по классической теории Герца: пятно контакта имеет эллиптическую форму, основная нагрузка должна приходиться на центральную часть опорного ролика.

В процессе эксплуатации ряд факторов (конструкционные и эксплуатационные)

приводит к повышению касательных сил, которые кроме качения способствуют возникновению продольного и поперечного крипа и спина, вызывая перераспределение нагрузок, что приводит к смещению основной нагрузки на края опорных роликов, что, в свою очередь, вызывает изменения внутренних напряжений поверхностного слоя и его деформацию.

В итоге поверхностные слои металлов в пятне контакта подвергаются не только деформациям, но и механическому трению, которое в условиях цеховой запыленности и влажности усугубляется абразивным и водородным изнашиванием.

Одним из методов решения проблемы повышения ресурса опорных роликов – упрочнение структуры боковых поверхностей опорных роликов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1 / Под ред. В.Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2004. 688 с.
2. Барабанные вращающиеся аппараты: учеб. пособие / Э.А. Козловский, А.Э. Козловский, И.А. Повтареv; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново: ИГХТУ, 2019. 106 с.
3. ОСТ 26-01-147-89. Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Общие технические требования.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон; пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
5. Сакало В.И., Коссов В.С. Контактные задачи железнодорожного транспорта. М.: Машиностроение, 2004. 496 с.
6. Котов С.Ю., Шкин Н.В. Анализ теории трения качения О. Рейнольдса // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 25-26 октября 2018 г. / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2018. С. 70–71.
7. Гончаров М.С., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В. Исследование пятна контакта бандажа цементной печи и опорного ролика // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова. Белгород, 2013. С. 536–540.
8. Шрубченко И.В., Кузнецова И.В. Исследование характеристик пятна контакта поверхностей качения технологических барабанов // Материалы V межрегиональной научно-технической конференции с международным участием «Механика XXI века». Братск, 2006. С. 242–246

9. Колобов А.В., И.И. Кузнецова М.И. Шрубченко Д.В. Кривенченко Определение характеристик пятна контакта бандажей и роликов технологического барабана / Наука и молодежь в начале нового столетия: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. учен., Губкин, 12-13 апреля 2007 г. / Губкин. филиал Белгор гос. технол. ун-та; Губкин: ИП Уваров В.М., 2007. С. 198–201.

10. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Sharapov R.R., Duyun T.A. & Shchetinin N.A. Investigation of Characteristics of Contact Bandages and Support Rollers of Rotating Technological Drums // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, № 1. pp. 195–203.

11. Азаркин, А.А., Макаренко К.В. Исследование влияния рабочего нагрева на достижение предельного состояния опорных роликов вращающихся печей // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: сборник научных трудов национальной конференции 07-10 февраля 2024 г./ под общ. ред. Т.Э. Сергутиной. Брянск, Брян. гос. инженер.-технол. ун-т. 2024. С. 123–126.

12. Lingaiah K. Machine Design Databook / New York: McGraw-Hill, 2003. 1332 p.

13. Žiga, A., Karač A., Vukojević D. The Contact Stresses Between Cement Kiln Tyre and Supporting Rollers // 12th International Research/Expert Conference «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology» TMT2008, Istanbul, Turkey, 26-30 August, 2008. pp. 793–796.

14. François D. Pineau A, Zaoui A. Mechanical Behaviour of Materials. V. II: Fracture Mechanics and Damage / Dominique Françoise. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013. 662 p.

15. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.

## REFERENCES

1. Lisenko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. Rotary kilns: heat engineering, management and ecology, Book 1, Heating engineer, / Edited by V.G. Lisenko. Moscow: Teplotekhnika, 2004. 688 p.
2. Drum rotating apparatuses: study guide. manual / E.A. Kozlovsky, A.E. Kozlovsky, I.A. Povtarev; Ivan. State Chemical and Technological University. Ivanovo: ISChTU, 2019, 106 p.
3. All-Union Standard 26-01-147-89. Drying machines with rotating drums. General technical requirements.
4. Johnson, K. Mechanics of contact interaction / K. Johnson; translated from English. Moscow: Mir, 1989, 510 p.
5. Sakalo V.I., Kossov V.S. Contact tasks of railway transport. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 496 p.
6. Kotov S.Yu., Shkin' N.V. Analysis of O. Reynolds rolling friction theory // New materials, equipment and technologies in industry: proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists, Mogilev, October 25-26, 2018 / Editor: I. S. Sazonov (chief editor) [et al. Mogilev: Belarusian-Russian University, 2018. pp. 70–71.
7. Goncharov M.S., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V. Investigation of the contact spot of a

cement kiln bandage and support roller. The International Scientific and Technical Conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 160th anniversary of the birth of V.G. Shukhov. Belgorod, 2013, pp. 536–540.

8. Shrubchenko I.V., Kuznetsova I.V. Investigation of the characteristics of the contact patch of the rolling surfaces of technological drums // Proceedings of the V Interregional scientific and technical conference with international participation «Mechanics of the XXI century». Bratsk, 2006, pp. 242–246

9. Kolobov A.V., And.And. Kuznetsova M.I., Shrubchenko D.V. Definition characteristic of the contact spot of a bandage and technological drum rollers / Science and youth at the beginning of the new century: proceedings of the International research - practical. conf. for students, post-graduates and young researches, Gubkin, 12-13 April 2007 / Gubkin. Belgorod branch of Belgorod State Technol. Un-ty; Gubkin: PE Uvarov V.M., 2007, pp. 198–201.

10. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Sharapov R.R., Duyun T.A. & Shchetinin N.A. Investigation of Characteristics of Contact Bandages and Support Rollers of

Rotating Technological Drums // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, № 1. pp. 195–203.

11. Azarkin, A.A., Makarenko K.V. Investigation of the effect of working heating on reaching the limiting state of the support rollers of rotary kilns // Actual issues of engineering, science, technology: proc. of the national conference on February 07-10, 2024/ under the general editorship of T.E. Sergutina. Bryansk, Bryan. state engineer.-technol. univ., 2024, pp. 123–126.

12. Lingaiah K. Machine Design Databook / New York: McGraw-Hill, 2003. 1332 p.

13. Žiga, A., Karač A., Vukojević D. The Contact Stresses Between Cement Kiln Tyre and Supporting Rollers // 12th International Research/Expert Conference «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology» TMT2008, Istanbul, Turkey, 26-30 August, 2008. pp. 793–796.

14. François D. Pineau A, Zaoui A. Mechanical Behaviour of Materials. V. II: Fracture Mechanics and Damage / Dominique Françoise. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013. 662 p.

15. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 544 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.01.2025; одобрена после рецензирования 28.01.2025; принята к публикации 04.02.2025

The article was submitted 16.01.2025; approved after reviewing 28.01.2025; assepted for publication 04.02.2025

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.03.2025. Выход в свет 28.03.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16