



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188

УДК 622.23.05.

Научная статья

Работоспособность валковой тарельчатой мельницы для помола цемента

Н.В. Калягина^а, И.И. Карпунин^б, А.В. Корнилова^с, И.Н. Сильверстов^б

^аМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

^бЗАО «Прочность», Российская Федерация, 109428, Москва, Рязанский пр-кт, д. 8а

^сРоссийский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 9 июня 2020 г.

Доработана: 9 июня 2020 г.

Принята к публикации: 9 июля 2020 г.

Ключевые слова:

валковая мельница, тарельчатые валки, напряженно-деформированное состояние, контактные напряжения, трение, износ

Аннотация. Машиностроение для цементной промышленности – составная часть тяжелой промышленности. Цементная отрасль является основным поставщиком сырья для производства бетона и железобетона. Для помола цемента используют два типа мельниц – шаровую и валковую. Последние десятилетия доказали большую эффективность вертикальной валковой мельницы для помола сырья. Ее эффективность в сочетании с осуществлением сушки, помола и сепарации в одном агрегате дает ей неоспоримое преимущество перед шаровой мельницей. Этим объясняется существенное увеличение доли валковых мельниц на рынке цементных мельниц. Процесс измельчения в таких мельницах происходит за счет истирания, соответственно, в процессе работы происходит износ трущихся деталей мельницы. В работе проведена оценка работоспособности мельницы с гладкими тарельчатыми валками. В процессе исследования была выявлена причина разрушения секторов мельницы производства компании FLSmidth, эксплуатирующейся на территории Российской Федерации. Проведенное исследование выявило причины разрушения деталей валковой мельницы: при одновременном воздействии рабочей нагрузки и смещения секторов, возникающего из-за интенсивного износа, суммарные эквивалентные напряжения превышают значение предела выносливости при циклическом нагружении. Следовательно, происходит накопление усталостной повреждаемости материала, формирование и рост трещин, что отрицательно сказывается на работоспособности мельницы. Предложен ряд мер для повышения работоспособности мельниц такой конструкции.

Введение

Известно, что для помола цемента используют шаровые и валковые мельницы. Первая конструкция шаровых мельниц была запатентована

во Франции более 120 лет назад. Долгое время эта конструкция не имела конкурентоспособных альтернатив. Однако в последние десятилетия она активно вытесняется с рынка валковыми мельницами. Эти мельницы позволяют проводить операции сушки, помола и сепарации в одном агрегате [1]. В работе [2] проведено сравнение опыта эксплуатации шаровой мельницы и первой валковой вертикальной мельницы, введенной в эксплуатацию в США в 2002 г. В [3] описано аналогичное многофакторное исследование, проведенное в Люксембурге. Показано, что валковые мельницы менее энергоемкие, чем аналоги, но более чувствительны к качеству сырья и более слож-

Калягина Надежда Вячеславовна, доцент кафедры прикладной механики факультета робототехники и комплексной автоматизации МГТУ имени Н.Э. Баумана; кандидат физико-математических наук, доцент; eLIBRARY Author ID: 633555, Scopus Author ID: 57164817100.

Карпунин Иван Иванович, генеральный директор.

Корнилова Анна Владимировна, профессор департамента строительства Инженерной академии РУДН; доктор технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5569-9320>, eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240, Author ID: 351426, Web of Science ResearcherID: U-3353-2017, Scopus Author ID: 7004499009; kornilova-av@rudn.ru

Сильверстов Игорь Николаевич, главный инженер; кандидат технических наук.

© Калягина Н.В., Карпунин И.И., Корнилова А.В., Сильверстов И.Н., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ны в техническом обслуживании. Кроме того, стоимость валковой мельницы обычно выше, но этот недостаток компенсируется высокой производительностью [4; 5]. Главной проблемой при эксплуатации валковых мельниц является интенсивный износ трущихся деталей [6], оказывающий преобладающее влияние на их работоспособность. Целью настоящего исследования является разработка математической модели контактной задачи расчета напряженно-деформированного со-

стояния (НДС) валковой мельницы и технических мероприятий, продлевающих срок ее службы.

1. Объект исследования

Объектом исследования является валковая тарельчатая мельница с гладкими тарельчатыми валками, предназначенная для измельчения материала методом истирания производства компании FLSmidth (отделение в России «ООО ФЛСмидт Рус») (рис. 1).

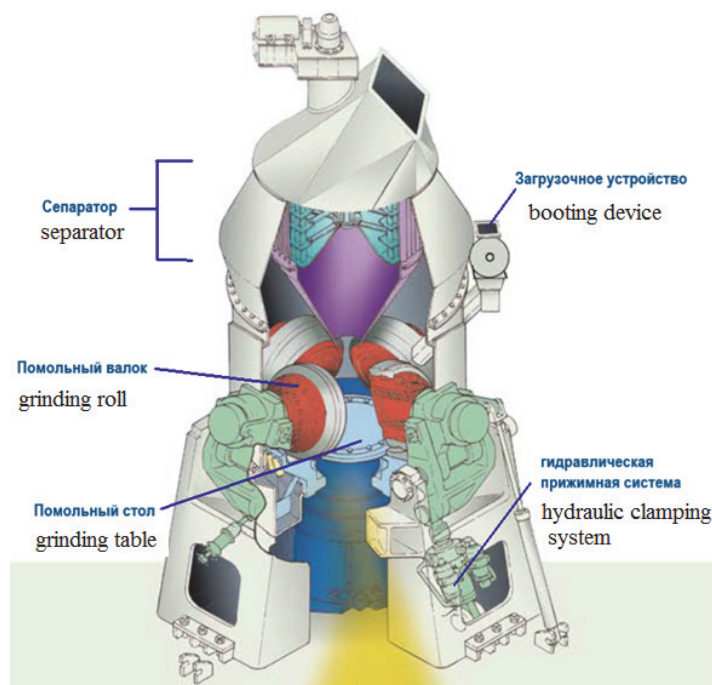


Рис. 1. Конструкция исследуемой валковой мельницы
[Figure 1. The design of the investigated roller mill]



Рис. 2. Разрушение секторов в области их контакта между собой
[Figure 2. Destruction of sectors in the area of their contact with each other]

Мельница состоит из трех помольных валков, движущихся по помольному столу. Мелющие валки вместе с общей для них нажимной рамой, оснащенной тремя тягами, образуют статически определимую систему, создающую равномерное распределение нагрузки на слой размалываемого продукта. Каждый мелющий валок подвижно соединен через нажимной элемент с нажимной рамой и может выполнять качающиеся боковые движения. В связи с этим и благодаря пружинной подвеске натяжной системы мелющие валки могут оптимально прижиматься к рабочей поверхности мелющего диска. Размалываемый продукт, попадающий в мельницу при загрузке, затягивается в промежуток между мелющими валками и мелющим диском, где подвергается измельчению. Необходимые для измельчения усилия создаются в результате прижатия мелющих валков к мелющему диску. Давление прижатия осуществляется с помощью гидропневматической натяжной системы и может быть изменено во время процесса. Измельчаемый продукт подвергается размолу под действием сил давления и сдвига.

В процессе работы происходит износ трущихся деталей мельницы. Наибольшему износу подвергается внешняя часть секторов валков, которые подлежат периодической замене. Экономичной альтернативой замене является наплавка твердым сплавом изнашиваемых поверхностей. Сегментная конструкция изнашиваемых поверхностей позволяет производить многократную наплавку твердым сплавом на протяжении всего срока службы. Кроме того, в процессе работы происходит фреттинг-износ пары «втулка – сектор». Износ втулки подшипника в зоне ее контакта с секторами приводит к увеличению радиальных смещений секторов и росту контактных напряжений в зоне контакта секторов друг с другом в окружном направлении. Значительные контактные напряжения являются причиной разрушения секторов в области их контакта между собой в зоне приливов (рис. 2).

2. Моделирование напряжено-деформированного состояния валков мельницы

Оценка НДС мельницы производилась методом конечных элементов (МКЭ) с помощью пакета прикладных программ ANSYS. Расчетная схема мельницы представляет собой втулку подшипника, на которую надеты секторы (рис. 3). В рас-

четной схеме втулка жестко соединена с кольцом. Секторы, закрепленные на втулке с помощью прижимов, опираются на кольцо и своей внутренней поверхностью контактируют со втулкой. Контактные поверхности представлены на рис. 4–6. На рис. 4–6 приняты следующие цифровые обозначения контактных поверхностей: 1 – втулки с прижимом; 2 – втулки, кольца и сектора; 3 – прижима с сектором; 4 – между секторами. Таким образом, конструкция мельницы имеет многокомпонентную систему сопряжения различных деталей, контактные связи между которыми – неголономные.

При расчете использован вариационно-энергетический подход МКЭ. Согласно [7–9], разрешающие уравнения МКЭ получены минимизацией полной энергии системы \mathcal{E} :

$$\delta \mathcal{E} = \delta U + \delta U_K - \delta A = 0,$$

где U – потенциальная энергия деформации; U_K – потенциальная энергия контактной зоны взаимодействия; A – работа внешних сил.

Приращение потенциальной энергии деформации системы контактирующих тел имеет вид

$$\delta U = \iiint_V \sigma \delta \varepsilon dV,$$

где σ – вектор напряжений; ε – вектор деформаций; V – объем элемента.

Контактная зона разделена на ряд контактных элементов. Контактный элемент описывает взаимодействие между поверхностным узлом одного тела с соответствующей поверхностью элемента другого тела. Приращение потенциальной энергии контактной зоны взаимодействия площадью S равно:

$$\delta U_K = \iint_S P_K \delta u_n dS + \iint_S \tau \delta u_t dS,$$

где u_n – величина контактного зазора в направлении нормали к поверхности; u_t – величина контактного зазора в тангенциальном направлении; P_k – контактное давление в направлении нормали к поверхности ($P_k = 0$, если $u_n > 0$, или $P_k = K_n u_n$, если $u_n \leq 0$); K_n – матрица жесткости контактной поверхности; τ – фрикционное напряжение.

При построении конечно-элементной модели применялись объемные конечные элементы SOLID285. Конечно-элементная модель представлена на рис. 7. При моделировании контакта поверхностей втулки с прижимом, втулки с сек-

тором, прижима с сектором и контакта между секторами использованы контактные элементы CONTA174 и TARGE170. Рабочая нагрузка вклю-

чала силы давления в радиальном $F_y = 2,6$ МН, в осевом направлении $F_z = 0,43$ МН и силы затяжки крепежных шпилек прижима $F_3 = 0,71$ МН.

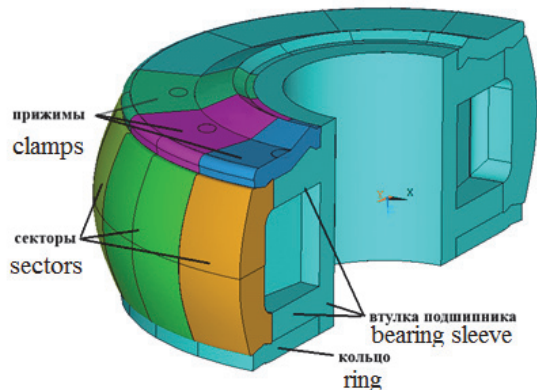


Рис. 3. Расчетная схема помольного вала
[**Figure 3.** The design scheme of the grinding roll]

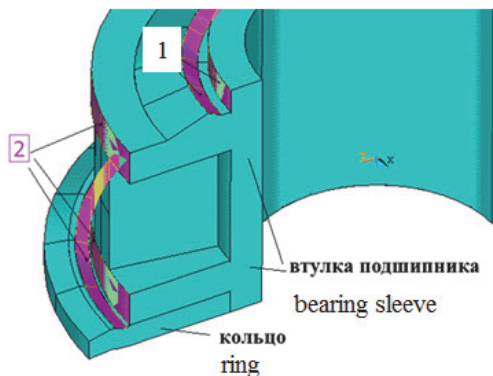


Рис. 4. Контактные поверхности втулки подшипника и кольца
[**Figure 4.** Contact surfaces of bearing sleeve and ring]

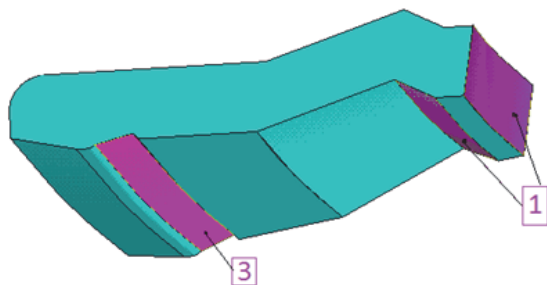


Рис. 5. Контактные поверхности прижима
[**Figure 5.** Contact surfaces of a clamp]

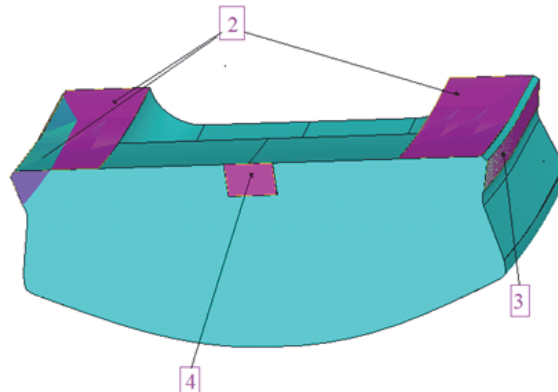


Рис. 6. Контактные поверхности сектора (дано изображение половины сектора)
[**Figure 6.** The contact surface of the sector (given the image of half the sector)]

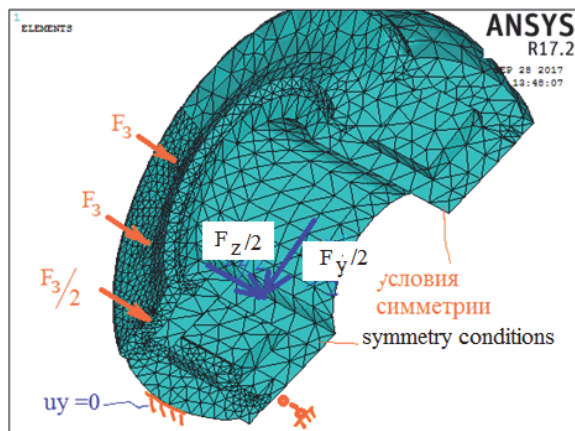


Рис. 7. Конечно-элементная модель
[**Figure 7.** The finite element model]

Согласно имеющейся технической документации втулка подшипника и сегменты изготовлены из чугуна. Материал втулки подшипника – чугун EN-GJS 400-18U. Наиболее близкий российский аналог высокопрочный чугун с шаровидным графитом ВЧ-40. Материал сегментов – высокопрочный чугун с шаровидным графитом EN-GJN-HV6000 (XCR18), что подтверждается протоколом химического анализа образцов, взятых из разрушенных сегментов (рис. 3). Наиболее близкий российский аналог – хромистый чугун типа ЧХ16М2.

В качестве характеристики, определяющей уровень напряженного состояния материала, принято эквивалентное напряжение по Мизесу.

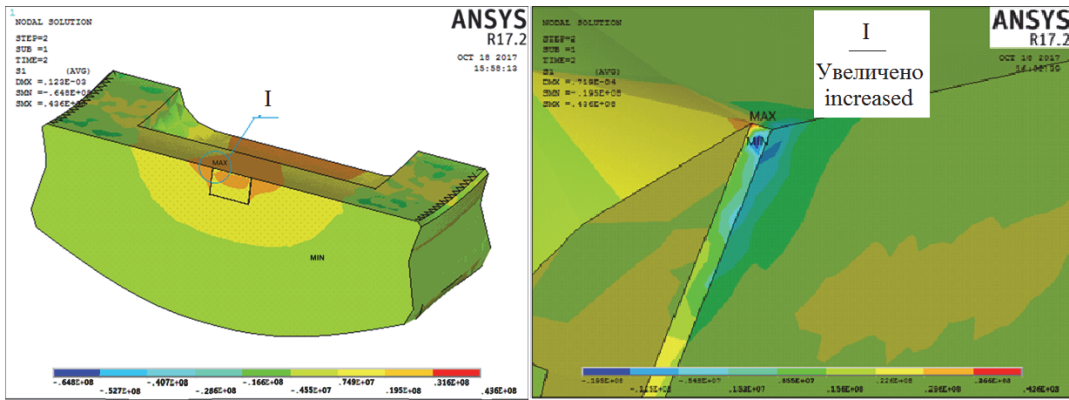


Рис. 8. Первое главное напряжение, Па
[Figure 8. The first main stress, Pa]

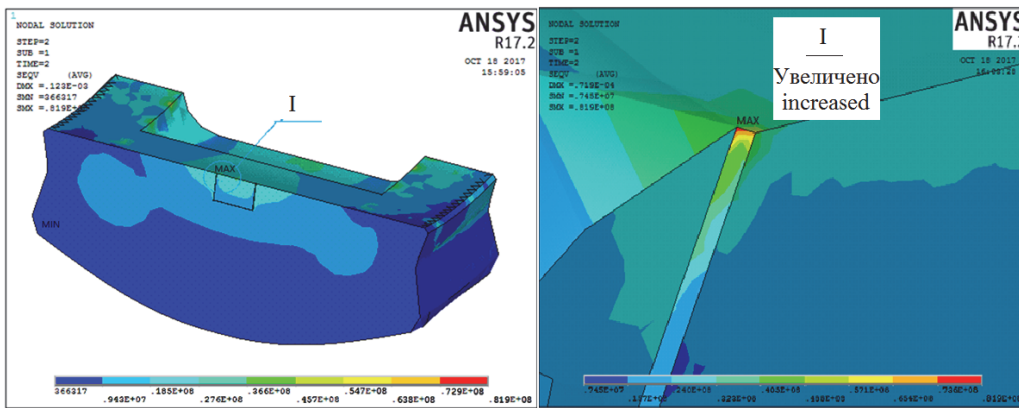


Рис. 9. Эквивалентные напряжения, Па
[Figure 9. Equivalent stresses, Pa]

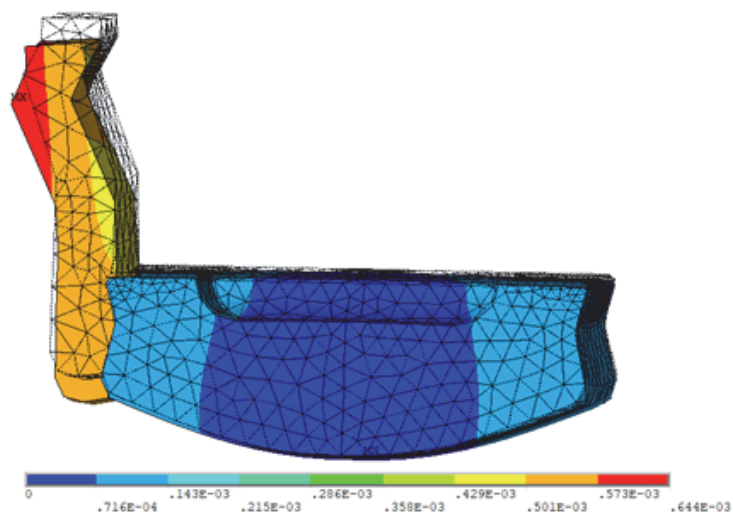


Рис. 10. Перемещения сектора и прижима в радиальном направлении, м
[Figure 10. Sector and clamp movements in the radial direction, m]

3. Результаты моделирования

Основные результаты расчета НДС представлены на рис. 8, 9. Расчет показал, что значения напряжений невысоки. Максимальные значения растягивающих напряжений достигают 43 МПа, а эквивалентные – 82 МПа в контактной зоне взаимодействия секторов. Вычисленные перемещения сектора и прижима показаны на рис. 10. Недеформированное состояние показано черным контуром. Смещение прижима составили 0,4–0,64 мм, максимальное смещение сектора 0,14 мм.

4. Исследование влияния износа втулки на разрушение сегмента

По мере износа контактирующих поверхностей сегменты конструкции мельницы смещаются и садятся на уменьшенный изношенный посадочный диаметр втулки подшипника. В конструкции мельницы предусмотрены зазоры между секторами, которые, как правило, составляют от 1 до 4 мм. При уменьшении посадочного радиуса имеющиеся зазоры постепенно выбираются. После того как зазоры оказываются выбранными, секторы начинают распирать друг друга в зонах приливов. При этом контактные напряжения в зоне приливов возрастают. При работе мельницы условие самоторможения в резьбе крепежных шпилек прижима нарушается и происходит

самоотвинчивание [10]. В случае неравномерности этого процесса износ контактирующих поверхностей сегментов и втулки также происходит неравномерно. Поэтому секторы могут смещаться относительно друг друга в радиальном направлении (перемещение Δ на рис. 11). При относительном смещении секторов на величину $\Delta = 0,5$ мм главные растягивающие напряжения достигают 64 МПа (рис. 12), а эквивалентные напряжения в зоне растяжения – 90 МПа (рис. 13).

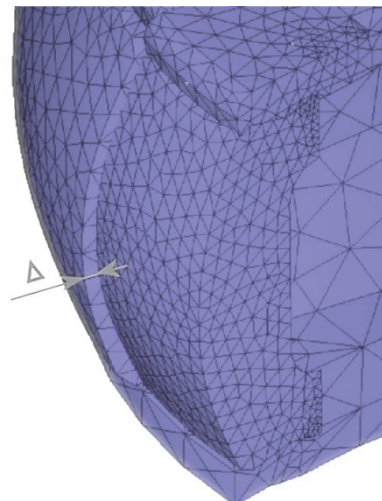


Рис. 11. Смещение Δ одного сектора относительно другого
[Figure 11. The displacement Δ of one sector relative to another]

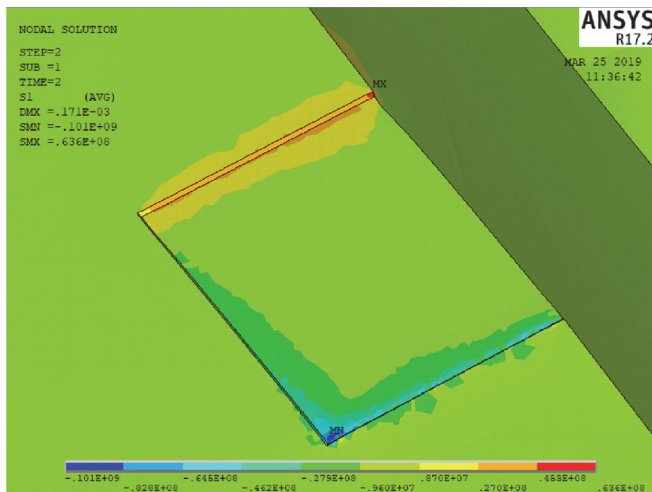


Рис. 12. Первые главные напряжения с учетом относительного смещения секторов, Па
[Figure 12. The first principal stresses, taking into account the relative displacement of the sectors, Pa]

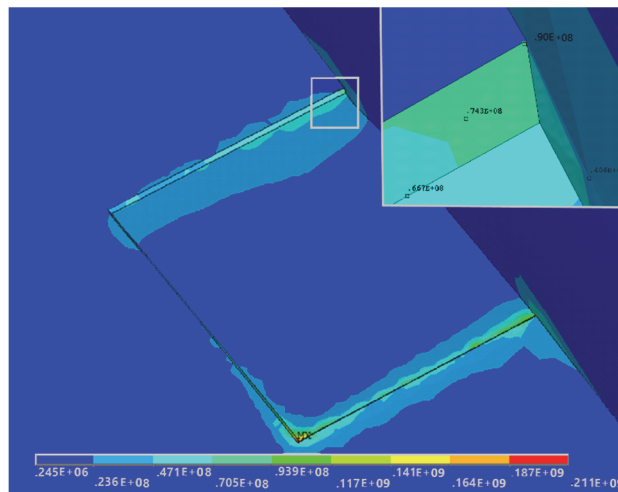


Рис. 13. Эквивалентные напряжения с учетом относительного смещения секторов, Па
[Figure 13. Equivalent stresses, taking into account the relative displacement of sectors, Pa]

При упругом деформировании конструкции эквивалентные напряжения, возникающие в результате действия рабочей нагрузки 82 МПа, сумми-

руются с напряжениями от смещения. При одновременном воздействии рабочей нагрузки и смещения $\Delta = 0,5$ мм суммарные эквивалентные на-

пряжения составляют 172 МПа. Предел выносливости материала валков, равный 200–210 МПа, с учетом понижающих факторов уменьшается практически в два раза и становится равным 100–105 МПа [11–14]. Таким образом, ресурс работы конструкции мельницы становится ограниченным, и создаются условия для развития усталостных трещин в контактной зоне приливов секторов, что и наблюдалось при обследовании мельницы.

Для определения допустимых параметров трещиноподобных дефектов можно использовать методику, предложенную в [15], разработанную для базовых деталей кузнечно-прессовых машин.

Заключение

Проведенное исследование выявило причины разрушения деталей валковой мельницы: при одновременном воздействии рабочей нагрузки и смещения секторов, возникающего из-за интенсивного износа, суммарные эквивалентные напряжения превышают значение предела выносливости при циклическом нагружении. Следовательно, происходит накопление усталостной повреждаемости материала, формирование и рост трещин, что отрицательно сказывается на работоспособности мельницы.

Для предотвращения разрушения сегментов и продления срока их службы необходимы следующие мероприятия:

- область контакта между секторами сформировать в виде приливов плавной формы, не имеющих концентраторов напряжений;
- обеспечить своевременную наплавку твердым сплавом изнашиваемой поверхности втулки подшипника в зоне ее контакта с сегментами;
- стабилизировать в процессе эксплуатации силу затяжки крепежных шпилек прижима;
- для уменьшения трения и износа целесообразно использовать антифреттинговые покрытия и смазки.

Список литературы / References

1. Brozek M, Naziemiec Z. Analysis of the mechanics of the comminution process of minerals in crushers and high-pressure grinding rolls. *Gospodarka surowcami mineralnymi [Mineral resources management]*. 2012;28(3):139–153.
2. Simmons M, Gorby L, Terembula J. Operational experience from the United States' first vertical roller mill

for cement grinding. *2005 IEEE. Cement Industry Technical Conference. Conference Record*. 2005. p. 241–249.

3. Altun D, Aydoğan N, Altun O, Benzer A. Performance Evaluation of Vertical Roller Mill in Cement Grinding: Case Study ESCH Cement Plant. *European symposium on comminution classification. Conference Paper 15*. 2017. p. 1–7.

4. Engeln I. Polysius roller mills for cement grinding – operating results from a Mexican cement works. *35th Krupp Polysius Cement Day. Conference Paper. ZKG International*. 2001;54(10):550–554.

5. Saito J, Hosono M, Shibuya K, Okano Y. Roller Mill as a Control Object. *IFAC Proceedings*. 1983;16(15):91–99.

6. Jung O. Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*. 2000;31(9):252–261.

7. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering]*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.)

Zenkevich O. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 540 с.

8. Zavarise G, Wriggers P, Schrefler B. A method for solving contact problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1998;42(3):473–498.

9. Kuss F, Lebon F. Stress based finite element methods for solving contact problems: comparisons between various solution methods. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(8):697–706.

10. Birger IA, Iosilevich GB. *Rez'bovyye flantsyevye soedineniya [Threaded flange connections]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1990. (In Russ.)

Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 365 с.

11. Terentyev VF, Korableva SA. *Uсталost' metallov [Fatigue of metals]*. Moscow: Nauka Publ.; 2015. (In Russ.)

Терентьев В.Ф., Коралева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.

12. Birger I.A. *Prochnost' i nadezhnost' mashinostroytel'nykh konstruksii [Strength and reliability of engineering structures]*. Ufa: USATU Publ.; 1998. (In Russ.)

Биргер И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций. Уфа: УГАТУ, 1998. 349 с.

13. Liao D, Peng Zhu S, Correia J, De Jesus A, Bertho F. Recent advances on notch effects in metal fatigue: A review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2020;43(4):637–659.

14. Kornilova AV, Idarmachev IM, Kyaw Zaya, Thtet Paing. *Prakticheskie aspekty otsenki povrezhdaemost' v usloviyakh mnogotsiklovoi ustalosti [Practical aspects of assessing damage under conditions of multi-cycle fatigue]*. Moscow: Pero Publ.; 2020. (In Russ.)

Корнилова А.В., Идармачев И.М., Чжо Зяяр, Тем Паинг. Практические аспекты оценки повреждаемость в условиях многоциклового усталости. М.: Перо, 2020. 115 с.

15. Kornilova AV, Kyaw Zaya. Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and press machines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):308–315. (In Russ.)

Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // Вестник Российского универси-

тета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 308–315.

Для цитирования

Калягина Н.В., Карпукхин И.И., Корнилова А.В., Сильверстов И.Н. Работоспособность валковой тарельчатой мельницы для помола цемента // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 181–188. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188

Research article

Capacity of roller mill for cement grinding

Nadezhda V. Kalyagina^a, Ivan I. Karpukhin^b, Anna V. Kornilova^c, Igor N. Silverstov^b

^aBauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),
5 2-ya Baumanskaya, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation

^bZAO «Prochnost», 8a Ryazanskii Ave, Moscow, 109428, Russian Federation

^cPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: June 9, 2020

Revised: June 9, 2020

Accepted: July 9, 2020

Keywords:

roller mill, disk rolls, stress-strain state, contact stresses, friction, wear

Abstract. Engineering for the cement industry is part of the heavy industry. The cement industry is the main supplier of raw materials for the production of concrete and reinforced concrete. For grinding cement, two types of mills are used – ball and roller. Recent decades have proven the great effectiveness of a vertical roller mill for grinding raw materials. Its effectiveness, combined with the implementation of drying, grinding and separation in one unit, gives it an undeniable advantage over a ball mill. This explains the significant increase in the share of roller mills in the cement mill market. The grinding process in such mills occurs due to abrasion, respectively, in the process of work wear of the rubbing parts of the mill occurs. The work evaluated the performance of a mill with smooth disk rolls. During the study, the cause of the destruction of the sectors of the mill produced by FLSmidth, operating in the Russian Federation, was identified. The study revealed the causes of the destruction of the details of the roller mill: with the simultaneous impact of the workload and the displacement of the sectors resulting from intensive wear, the total equivalent stresses exceed the value of the endurance limit under cyclic loading. Therefore, the accumulation of fatigue damage to the material, the formation and growth of cracks, which adversely affects the performance of the mill. A number of measures have been proposed to increase the operability of mills of this design.

For citation

Kalyagina NV, Karpukhin II, Kornilova AV, Silverstov IN. Capacity of roller mill for cement grinding. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):181–188. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188>

Nadezhda V. Kalyagina, Associate Professor of Department of Applied Mechanics of Faculty of Robotics and Complex Automation of BMSTU; Candidate of Physico-Mathematical Sciences, PhD; eLIBRARY Author ID: 633555, Scopus Author ID: 57164817100.

Ivan I. Karpukhin, CEO.

Anna V. Kornilova, Professor of the Construction Department of the Academy of Engineering of RUDN University; Doctor of Technical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5569-9320>, eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240, Author ID: 351426, Web of Science ResearcherID: U-3353-2017, Scopus Author ID: 7004499009; kornilova-av@rudn.ru

Igor N. Silverstov, chief engineer; Candidate of Technical Sciences.