УДК 539.3/8

Расчет температурных полей и термических напряжений в толстостенном цилиндре при импульсном подводе теплоты

П.В. Жуков
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Ролики рольганга, предназначенного для транспортировки раскаленных металлических слябов, испытывают циклические термомеханические нагрузки, что приводит к снижению надежности и уменьшению безаварийного срока их эксплуатации. В связи с этим приобретает особую актуальность задача исследования термонапряженного состояния ролика при импульсном подводе теплоты.
Методы и материалы: Для моделирования теплового и термонапряженного состояния ролика используется уравнение теплопроводности с учетом импульсного подвода тепловой энергии в точке контакта сляба с роликом.
Результаты: Получено решение уравнения теплопроводности с учетом импульсного подвода тепловой энергии в точке контакта сляба с роликом, на основе которого найдены распределения термоупругого потенциала перемещений и термических напряжений в ролике.
Выводы: Предложенная модель позволила сначала определить температурное поле, а затем поле термических напряжений во вращающемся ролике при импульсном подводе теплоты в точке его контакта со слябом. Предложенный подход к определению термонапряженного состояния ролика позволяет разрабатывать технологические мероприятия, направленные на повышение надежности и продление срока службы роликов машин непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: ролики, рольганг, температурное поле, термические напряжения.

Calculation of Temperature Fields and Thermal Stresses in Thick-Walled Cylinder under Impulse Heat Supply

P.V. Zhukov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background: Rollers of roll carrier that are designed for transportation of hot metal slabs suffer from cyclic thermomechanical loads that leads to reducing their reliability and time of accident-free operation. According to this, it is very urgent to research the thermal and tension states of rollers while impulse heat supply.
Materials and methods: For modeling of the thermal and thermal-stress state of the roller the heat conduction equation with the pulsed supply of thermal energy at the point of contact with the slab is used.
Results: The solution to the thermal conductivity equation in accordance with the impulse heat energy supply at the contact point of the slab with a roller is received; so, the distributions of thermoelastic movement potential and thermal stresses in the roller are discovered.
Conclusions: The proposed model allows at first to determine the temperature field, and then the field of thermal stresses in the rotating roller under impulse heat supply at the contact point of it with the slab**.** The proposed approach to determine the thermal-stress state of a roller allows to develop technological measures to improve the reliability and enlarge the time of accident-free operation of continuous casting machines**.**

Key words: roller, roll carrier, temperature field, thermal stresses.

Транспортировка раскаленного металла в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) осуществляется с помощью вращающихся роликов рольганга [1]. Совокупность циклических механических и термических напряжений обусловливает снижение надежности и уменьшение срока их эксплуатации. Обеспечение безопасной и надежной работы оборудования является актуальной научной и практической задачей [2].

Целью исследования является разработка мероприятий по повышению надежности и безаварийной эксплуатации роликов на основе моделирования и расчетных исследований термических напряжений.

Для достижения цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка математической модели теплопроводности во вращающемся цилиндре для определения температурных полей;
- расчет температурных напряжений, обусловленных температурными полями во вращающихся роликах;
- разработка рекомендаций по повышению надежности работы оборудования на основе

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

проведенного анализа термонапряженного состояния роликов МНЛЗ.

Объектом исследования является ролик рольганга, эскиз которого представлен на рис. 1. Раскаленный сляб 1 двигается поступательно по вращающемуся ролику 2, для охлаждения которого подается теплоноситель 3.

Опыт эксплуатации показывает, что наиболее «опасными» являются середина ролика и участки, по которым проходит граница сляба 4. Особый интерес в связи с этим представляет трехмерная постановка задачи теплопроводности, которая позволяет исследовать термические напряжения во всех точках ролика. Для моделирования теплопроводности в цилиндре выбирается цилиндрическая система координат, направления осей которой представлены на рис. 1,б.

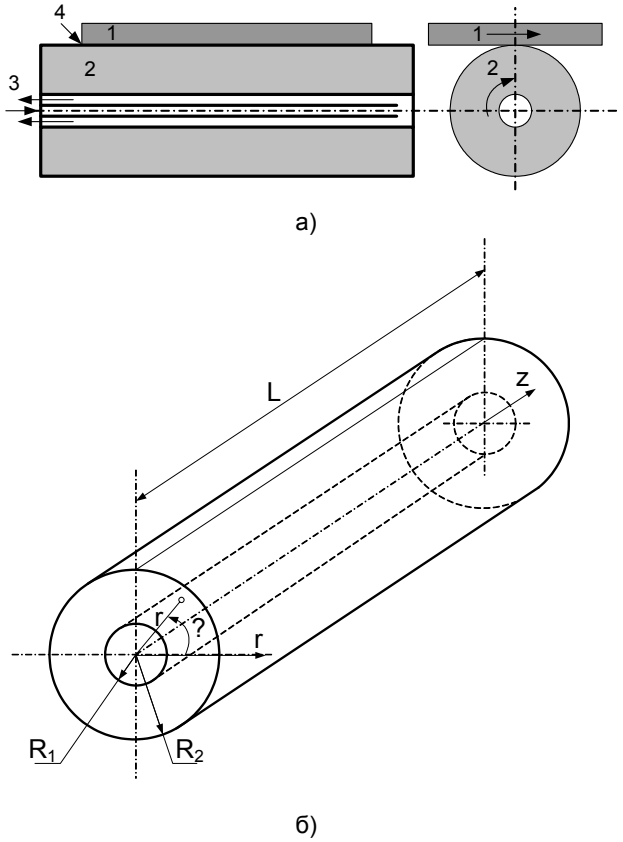

Рис. 1. Эскиз ролика (а) и его модельное представление в цилиндрической системе координат (б): 1 – транспортируемый сляб; 2 – ролик рольганга; 3 – потоки охлаждающей жидкости; 4 – граница сляба

Для расчета температурного поля воспользуемся уравнением теплопроводности, записанным в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right], \qquad (1)$$

где T – температура; r, φ, z – координаты (ось z совпадает с осью ролика); t – время процесса; a – коэффициент температуропроводности.

Для решения параболического уравнения (1) необходимо задать краевые условия. Граничные условия первого рода задаются значением температуры в точках контакта поверхности ролика с металлом и значением температуры внутренней охлаждаемой поверхности. В остальных точках наружной поверхности ролика, в которых контакт с металлом отсутствует, теплообмен излучением от металла и конвективный отвод теплоты воздухом от ролика на первом этапе исследования не учитываются. Решение уравнения (1) выполняется матричным методом с использованием математического аппарата теории цепей Маркова [3, 4]. Результаты численного решения уравнения (1) представлены на рис. 2, 3 в виде температурных полей внутри ролика.

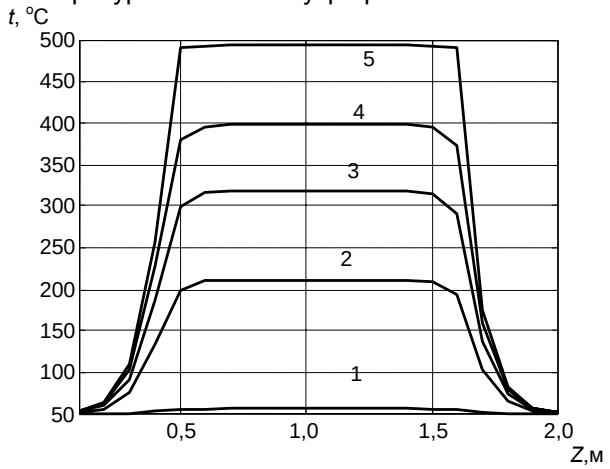

Рис. 2. Зависимость температуры от осевой координаты (z) при разных значениях относительной радиальной координаты: 1 – $r/R2$ = 0,1935; 2 – $r/R2$ = 0,3548; 3 – $r/R2$ = 0,5161; 4 – $r/R2$ = 0,7581; 5 – $r/R2$ = 1,0

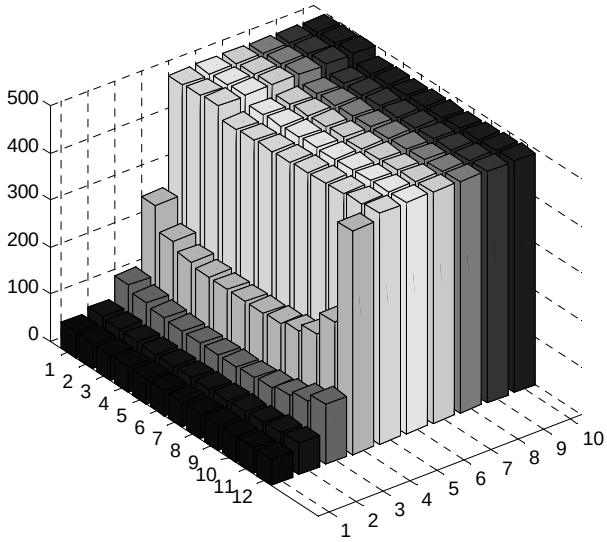

Рис. 3. Зависимость температуры поверхностного слоя ($r/R2$ = 1) от окружной и осевой (φ, z) координат

Полученные в результате расчета температурные поля позволяют определить термические напряжения в ролике. Квазистационарная задача термоупругости решается на основе использования термоупругого потенциала перемещений F [5] (производные по координатам дают непосредственно перемещения). Значения функции F могут быть найдены при решении уравнения Пуассона:

$$\Delta F = \frac{1+\mu}{1-\mu}\alpha T, \qquad (2)$$

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

где Δ – оператор Лапласа; μ – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного расширения. Распределение термических напряжений находится подстановкой найденных значений F в выражение

$$\sigma_{ik} = 2G\left[\frac{\partial^2 F}{\partial i\,\partial k} - \Delta F \cdot \delta_{ik}\right], \qquad (3)$$

где σ – величина термических напряжений; G – модуль сдвига;

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 0 \ при \ i \neq k \\ 1 \ при \ i = k \end{cases} \quad (i, k = x, y, z).$$

Оператор Лапласа в цилиндрической системе координат записывается в виде

$$\Delta F = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial F}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}. \qquad (4)$$

Найденные согласно (2) и (3) значения термоупругого потенциала перемещений и термических напряжений представлены на рис. 4, 5. Объединение всех составляющих усилия в одной точке в единственную величину выполняется согласно гипотезе формоизменения: переход материала в предельное состояние произойдет тогда, когда величина удельной потенциальной энергии формоизменения достигнет предела текучести. Эквивалентные напряжения по этой гипотезе называются эквивалентными напряжениями по Мизесу [6] и определяются по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}}, \qquad (5)$$

где σ_i – эквивалентное напряжение по Мизесу.

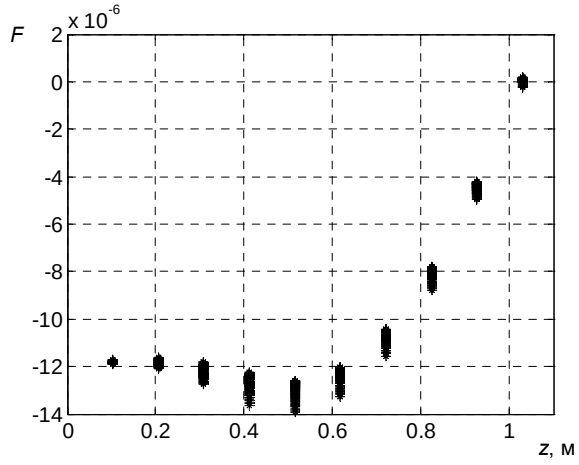

Рис. 4. Проекция значений термоупругого потенциала перемещений в разных поперечных сечениях ролика на ось z

На рис. 6 приведены результаты тестовых расчетных исследований, выполненных для следующих исходных данных: теплопроводность стали 50,5 Вт/м/К; плотность стали 7489 кг/м^3; теплоемкость стали 691 Дж/кг/К; длина ролика L = 2060 мм; ширина сляба l = 1200 мм; внешний радиус ролика R_2 = 155 мм; внутренний радиус ролика R_1 = 30 мм.

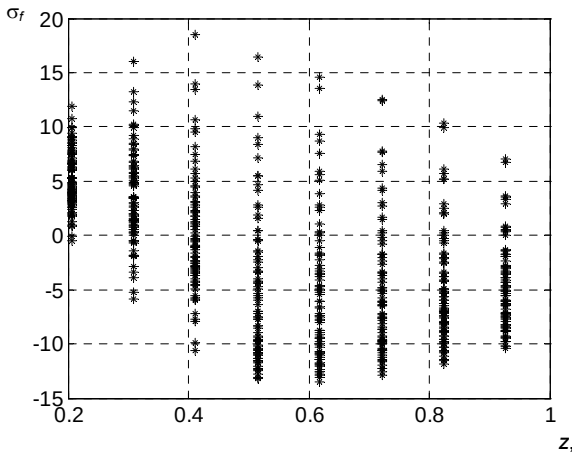

Рис. 5. Проекция значений окружной проекции нормальных термических напряжений (МПа) в разных сечениях ролика на ось z

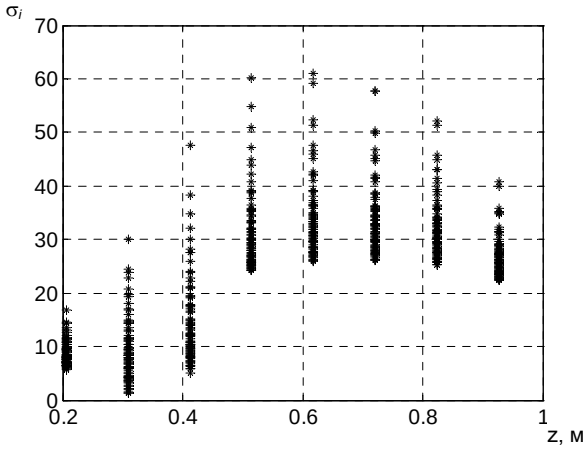

Рис. 6. Проекция поля значений эквивалентных термических напряжений по Мизесу (МПа) в разных сечениях ролика на ось z

Результаты исследований технологических режимов эксплуатации роликов в целях разработки мероприятий, направленных на повышение надежности эксплуатации и увеличения срока службы оборудования, приведены на рис. 7, 8. На рис. 7 показана расчетная зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений по Мизесу (5) в ролике от температуры металла на внешней поверхности ролика в месте контакта ролика со слябом. Значение температуры металла на внутренней охлаждаемой водой поверхности принимается равным t_{g2} = 50 °С. При совпадении температур металла на внешней и внутренней поверхностях ролика температурные напряжения принимают практически нулевые значения. Данная тестовая проверка подтверждает достоверность предложенного метода определения термонапряженного состояния ролика и алгоритмов его компьютерной реализации [3].

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

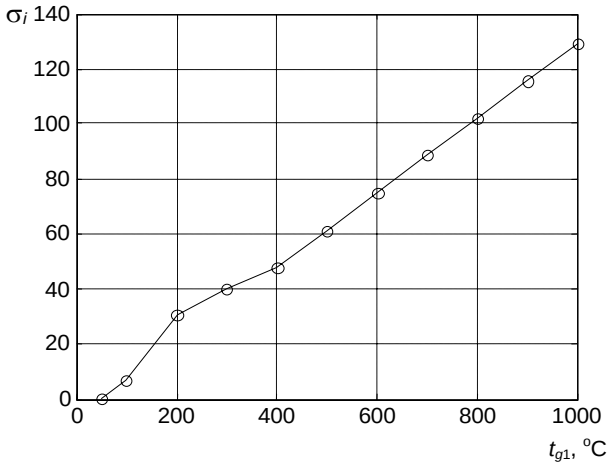

Рис. 7. Зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений по Мизесу (МПа) в ролике от температуры на внешней поверхности ролика в месте контакта ролика со слябом (t_{g2} = 50 °C)

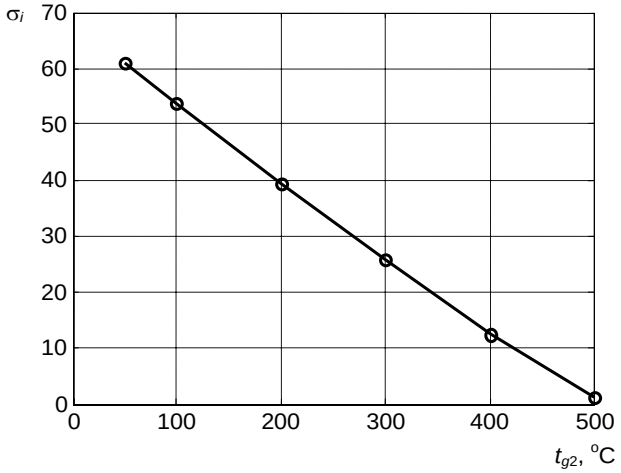

Рис. 8. Зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений по Мизесу (МПа) в ролике от температуры на поверхности ролика внутри охлаждаемого канала (t_{g1} = 500 °C)

На рис. 8 приводится расчетная зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений по Мизесу (5) в ролике от температуры металла на внутренней поверхности ролика. При совпадении значений температур металла на внутренней и внешней поверхностях ролика температурные напряжения также принимают практически нулевые значения.

При известных характеристиках материала ролика и режиме его охлаждения предложенный подход позволяет оценить термонапряженное состояние ролика и выбрать технологические режимы, обеспечивающие надежную и безаварийную работу оборудования.

Предложенный подход может использоваться при выполнении проектных и наладочных работ и анализе режимов работы технологического оборудования в металлургической и химической отраслях промышленности.

Список литературы

1. **Мизонов В.Е, Виноградов В.Н., Жуков П.В.** Исследование переходных процессов теплообмена в толстостенных охлаждаемых цилиндрах с импульсным подводом теплоты // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 17–20.

2. **Целиков А.А., Шусторович В.М., Буторов А.В**. Экспериментальное исследование температурных полей в роликах машины непрерывного литья // Тр. ВНИИМЕТМАШа. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 1979. – № 57. – С. 141–145.

3. **Жуков В.П., Беляков А.Н., Жуков П.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2012611546 от 10 февраля 2012 года.

4. **Рояк М.Э., Соловейчик Ю.Г., Шурина Э.П.** Сеточные методы решения краевых задач математической физики. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 120 с.

5. **Мелан Э., Паркус Г.** Термоупругие напряжения, вызываемые стационарными температурными полями. – М.: Физматгиз, 1958. – 167 с.

6. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

References

1. Mizonov, V.E, Vinogradov, V.N., Zhukov, P.V. Issledovanie perekhodnykh protsessov teploobmena v tolstostennykh okhlazhdaemykh tsilindrakh s impul'snym podvodom teploty [Research of Heat Exchange Transient Process in Thick-Walled Cooled Cylinders with Impulse Heat Supply]. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 3.

2. Tselikov, A.A., Shustorovich, V.M., Butorov, A.V. Eksperimental'noe issledovanie temperaturnykh poley v rolikakh mashiny nepreryvnogo lit'ya [The Experimental Research of Temperature Fields in Rollers of Continuous Casting Machine]. *Trudy VNIIMETMASha* [Works of All-Russian Scientific and Research and Project Designing Institute of Metallurgical Machine-building]. Moscow, VNIIMETMASh, 1979, no. 57, pp. 141–145.

3. Zhukov, V.P., Belyakov, A. N., Zhukov, P.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM, № 2012611546, 2012.

4 Royak, M.E., Soloveychik, Yu.G., Shurina, E.P. *Setochnye metody resheniya kraevykh zadach matematicheskoy fiziki* [Grating Methods of Boundary-value Problems Solutions of Mathematical Physics]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 1998. 120 p.

5. Melan, E., Parkus, G. *Termouprugie napryazheniya, vyzyvaemye statsionarnymi temperaturnymi polyami* [Thermoelastic Stresses caused with Permanent Temperature Fields]. Moscow, Fizmatgiz, 1958. 167 p.

6. Feodos'ev, V.I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of Materials]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Baumana, 1999. 592 p.

Жуков Павел Владимирович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»