



УДК 621.771.014.2

Поступила 16.11.2016

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ ПОЛОСЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ОБЖАТИЕМ И ИЗГИБОМ КОНЦЕВОГО УЧАСТКА MODELING OF STRIP'S ROLLING WITH VARIABLE COMPRESSION AND AN ELEMENT END'S BENDING

Л. А. ИСАЕВИЧ, Д. М. ИВАНИЦКИЙ, М. Л. НЕСТЕРОВИЧ, А. Д. КРИЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.  
E-mail: maxim03021992@gmail.com

L. A. ISAEVICH, D. M. IVANICKIY, M. L. NESTEROVICH, A. D. KRICKIJ, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: maxim03021992@gmail.com

*Проведено моделирование процесса прокатки полосы с переменным обжатием и изгибом концевого участка. Получена компьютерная модель полуфабриката для изготовления чеки тормозной колодки железнодорожного транспорта. Рассчитаны значения коэффициентов теплопередач при контакте заготовки с воздухом, валком и оправкой. Определена температура нагрева заготовки для соблюдения оптимальных условий прокатки. Установлено распределение напряжений в очаге деформации и падение температуры заготовки по мере протекания процесса прокатки.*

*Modeling of process of strip's rolling with variable compression and an end's bending was carried out. The computer model of production of a brake shoe pin of railway transport was defined. The values of the heat transfer coefficients during the contacts of workpiece with air, and the mandrel roll were defined. The heating temperature of the workpiece is required to comply conditions of rolling was identified. Tension distribution in hotbeds of deformation and the fall of the workpiece temperature as the flow of the rolling process has been fixed.*

**Ключевые слова.** Моделирование прокатки, распределение напряжений, распределение температуры.

**Keywords.** Modeling of rolling, stress distribution, temperature distribution.

В настоящее время исследование различных технологических процессов тесно связано с использованием пакетов прикладных программ, моделирующих ту или иную ситуацию и дающих практически полную сходимость с экспериментальными данными. Работа этих программ основана на методе конечных элементов – разбиении тела на заданное количество элементов и поиске решения поставленной задачи. Так, был смоделирован процесс прокатки полосы с переменным обжатием и изгибом ее концевого участка. Модель прокатки заключается в том, что нагретую заготовку 1 размещают на профилированной оправке 2, которая затягивается приводными валками 3 и 4 в зазор между ними и прокатывается переменный профиль (рис. 1) [1]. Такая технология прокатки используется при изготовлении чеки тормозной колодки железнодорожного транспорта. Эскиз готового изделия показан на рис. 2.

Целью моделирования было исследование течения металла, а также распределение напряжений и температуры заготовки в очаге деформации по мере протекания процесса прокатки. В качестве начальных условий выбраны: исходные размеры заготовки – 12×20×228 мм; материал заготовки – сталь 45 ГОСТ 1050-88 [2]; коэффициент трения между верхним валком и заготовкой, оправкой и заготовкой  $f = 0,3$  [3]; материал валков и оправки – Сталь 5ХНМ ГОСТ

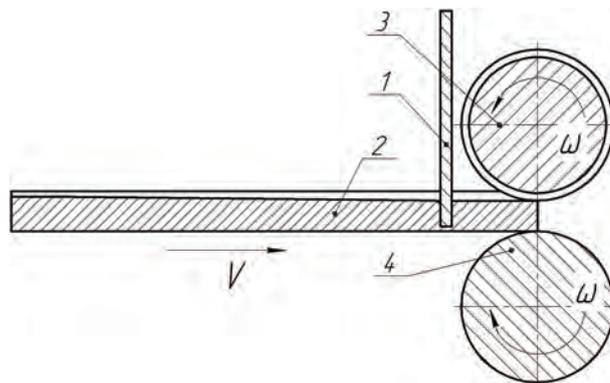


Рис. 1. Схема модели процесса прокатки: 1 – заготовка; 2 – профилированная оправка; 3 – профилированный валок; 4 – гладкий валок

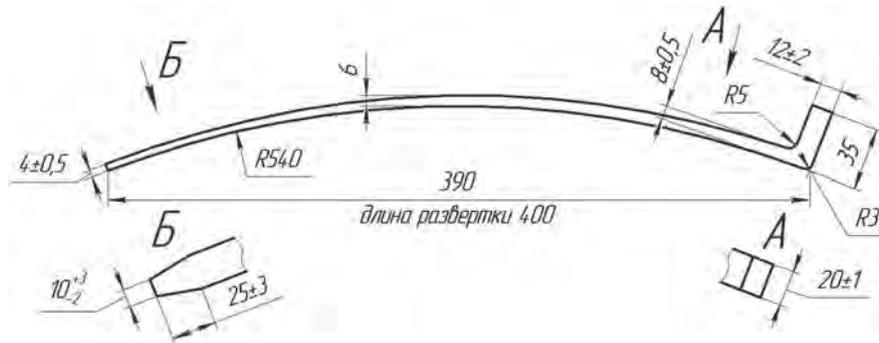


Рис. 2. Эскиз готового изделия

5950-2000; температура заготовки перед началом прокатки  $t_0 = 900$  °С; температура валков и оправки  $t_b = 150$  °С; температура окружающего воздуха  $t_{\text{воз}} = 20$  °С; скорость вращения валков  $\omega = 1,256$  рад/с; длительность процесса прокатки – 5 с.

Чтобы определить значение температуры заготовки в любой момент времени, необходимо вычислить коэффициент теплоотдачи.

Процесс теплообмена наружной поверхности заготовки с окружающим воздухом происходит за счет конвекции и лучеиспускания и характеризуется коэффициентом теплоотдачи. Это характерно при переносе заготовки от места нагрева к прокатному стану. Коэффициент теплоотдачи можно вычислить по формуле [4]

$$\alpha_{\text{л+к}} = \frac{4,54 \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{воз}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_0 - t_{\text{воз}}} + 2,56 \sqrt[4]{t_0 - t_{\text{воз}}} =$$

$$= \frac{4,54 \left[ \left( \frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right]}{900 - 20} + 2,56 \sqrt[4]{900 - 20} = 111,23 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С}) \quad (1)$$

При прокатке за один проход температура заготовки падает за счет теплопроводности при контакте с деформирующим инструментом (валком и оправкой) и прирастает за счет работы деформации [3]

$$t_1 = t_0 + \Delta t_{\text{д}} - \Delta t_{\text{к}}, \quad (2)$$

где  $\Delta t_{\text{д}}$  – прирост температуры за счет работы деформации;  $\Delta t_{\text{к}}$  – потери температуры за счет контакта с валком и оправкой.

Согласно закону Фурье, можно записать, что плотность теплового потока составляет [4]:

$$q = -\lambda \text{ grad } T = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\text{grad } T$  – градиент температуры.

Коэффициент теплопроводности для стали 5ХНМ, из которой изготовлены валки и оправка, при  $t_b = 150$  °С равен  $\lambda \approx 43$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [5]. Если принять, что градиент температуры изменяется по линейному закону, а длина прокатываемого участка  $l = 0,4$  м, то можно определить коэффициент теплоотдачи от заготовки к валку и оправке

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} = \frac{43}{0,4} = 107,5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С}). \quad (4)$$

Значение коэффициента теплоотдачи, полученное по формуле (4), используем для моделирования.

В случае экспериментального исследования процесса необходимо учитывать контакт заготовки с воздухом при переносе ее от места нагрева к прокатному стану, что приводит к потерям ее температуры. Поэтому температуру нагрева заготовки обычно принимают больше температуры деформирования. Примем допущение, что от места нагрева к прокатному стану заготовку перемещают в течение времени  $\tau = 7$  с. Тогда потери по закону охлаждения Ньютона составят [4]

$$Q = \alpha_{л+к} F (t_0 - t_в) \tau = 111,23 \cdot 0,0151 \cdot (900 - 20) \cdot 7 = 10346,17 \text{ Вт}, \quad (5)$$

где  $F$  – площадь контактируемой с воздухом поверхности, равная  $0,0151 \text{ м}^2$ . С другой стороны, потери будут равны [4]

$$Q = cm\Delta t, \quad (6)$$

где  $c$  – средняя теплоемкость, для стали 45 составляет  $695 \text{ Дж/(кг } ^\circ\text{C)}$  [5];  $m$  – масса заготовки, равная  $0,428 \text{ кг}$ ;  $\Delta t$  – падение температуры при переносе от места нагрева к прокатному стану.

С учетом формул (5) и (6) падение температуры в заготовке составит

$$\Delta t = \frac{Q}{cm} = \frac{10346,17}{695 \cdot 0,428} = 34,78 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ округлим до } 40 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что температура деформирования заготовки должна составлять не менее  $900 \text{ } ^\circ\text{C}$  [5], примем температуру ее нагрева  $t_{\text{нагр}} = 940 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Теперь с учетом пересчитанного значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{л+к} = 120,57 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$  вычислим по формулам (5) и (7) падение температуры заготовки при ее переносе от места нагрева к прокатному стану

$$Q = 120,57 \cdot 0,0151 \cdot (940 - 20) \cdot 7 = 11724,6 \text{ Вт},$$

$$\Delta t = \frac{11724,6}{0,428 \cdot 695} = 39,41 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, температура нагрева заготовки  $t_{\text{нагр}} = 940 \text{ } ^\circ\text{C}$  является необходимой для соблюдения температурных условий процесса прокатки.

Условно процесс разбиваем на десять шагов, каждый через  $0,5 \text{ с}$ . На рис. 3 показаны основные переходы процесса прокатки.

По результатам моделирования получили значения напряжений в очаге деформации. На рис. 4 показана расчетная модель эпюры нормальных контактных напряжений, состоящей из  $n$  элементов по длине  $L$  очага деформации. Здесь же различными цветами на шкале

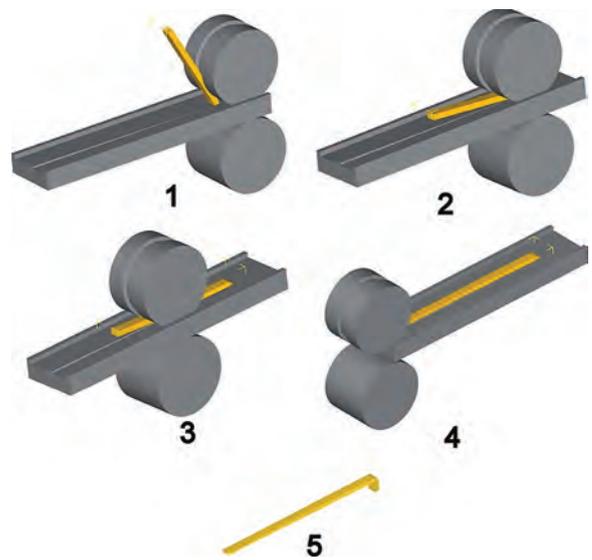


Рис. 3. Протекание процесса прокатки: 1 – касание валком заготовки; 2 – изгиб и укладывание заготовки на оправку; 3 – процесс прокатки с переменным обжатием; 4 – прокатка завершена; 5 – прокатанная чека

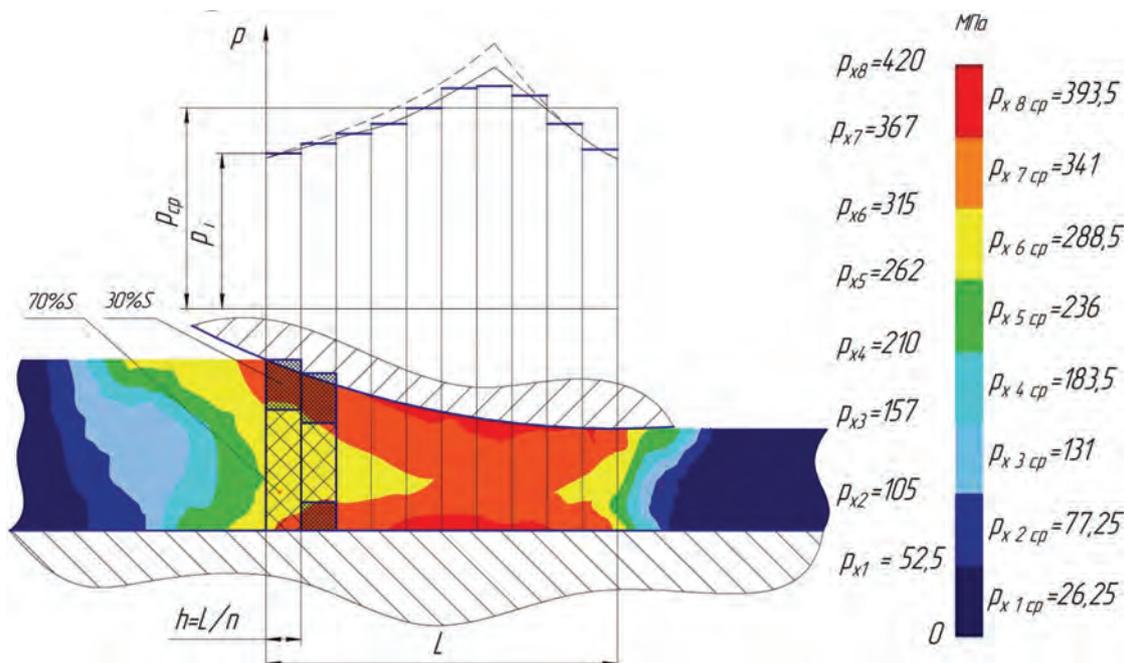


Рис. 4. Эпюра распределения напряжений в очаге деформации

показано распределение напряжений от  $p_{xi}$  до  $p_{x(i+1)}$ . Для каждого элемента, обозначенного определенным цветом, находим среднее значение напряжений:

$$p_{xi_{cp}} = \frac{p_{xi} + p_{x(i+1)}}{2} \tag{8}$$

Для нахождения значений нормальных контактных напряжений в каждом из элементов определяем процентное соотношение площадей средних значений напряжений  $p_{xi}$ . Фигуры неправильной формы, выделенные различным цветом в каждом из элементов очага деформации (рис. 4) с допустимой погрешностью, представляем в виде прямоугольников. Например, в первом элементе 30% от общей площади участка с напряжением 341 МПа, 70% – 288,5 МПа.

Модель процесса прокатки импортировали в масштабе 1:1, поэтому площади, на которых представлены напряжения одного значения, определяли измерением. Нормальное контактное напряжение равно сумме средних напряжений  $p_{xi_{cp}}$ , умноженных на отношение площади с  $i$ -м напряжением к общей площади:

$$p_i = \sum_{i=1}^k (p_{xi_{cp}} m_i S), \tag{9}$$

где  $k$  – количество напряжений различной величины, показанных на данном участке;  $m$  – процентное отношение площади с  $i$ -м напряжением к общей площади элемента.

По серединным точкам нормального контактного напряжения каждого из элементов построена сглаживающая кривая.

Среднее значение напряжений вычисляем делением суммы нормальных контактных напряжений на количество участков разбиения:

$$p_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}, \tag{10}$$

где  $n$  – количество конечных элементов, представленных в очаге деформации.

Построенная по результатам моделирования эпюра нормальных контактных напряжений имеет значения несколько меньшие, чем теоретическая эпюра распределения напряжений в очаге деформации (штриховая линия на рис. 4), что объясняется допустимыми погрешностями методик расчета и моделирования.

Значения температуры принимали для серединной области очага деформации. Величину обжатия по мере протекания процесса прокатки измеряли с использованием моделирующей программы. Результаты моделирования приведены в таблице.

**Результаты моделирования процесса прокатки**

Описание	Время $\tau$ , с	Обжатие $\Delta h$ , мм	Среднее напряжение $p_{cp}$ , МПа	Температура в очаге деформации $t$ , °C
Прокатка не началась	0	0	0	900
Касание валком заготовки	0,5	0	175	882,5
Укладывание заготовки на оправку	1	4	289,5	795
Процесс прокатки	2	5,1	336,2	741
	3	6	355	732,5
	4	7,3	370	729
	4,5	8	378,8	724
Прокатка завершена	5	–	–	–

На основании полученных данных построили график изменения среднего нормального контактного напряжения и температуры в течение процесса прокатки. Как видно из рис. 5, сопротивление деформации по мере протекания процесса прокатки возрастает. Это связано с постоянным нарастанием обжатия и падением температуры заготовки в очаге деформации. Скачок напряжения от 175 до 289,5 МПа связан с падением пластичности заготовки ввиду наибольшего снижения температуры, которое обусловлено изгибом и укладыванием заготовки на оправку. До полного укладывания заготовки на оправку теплообмен происходит только со стороны профилированного вала, а затем – с обеих сторон.

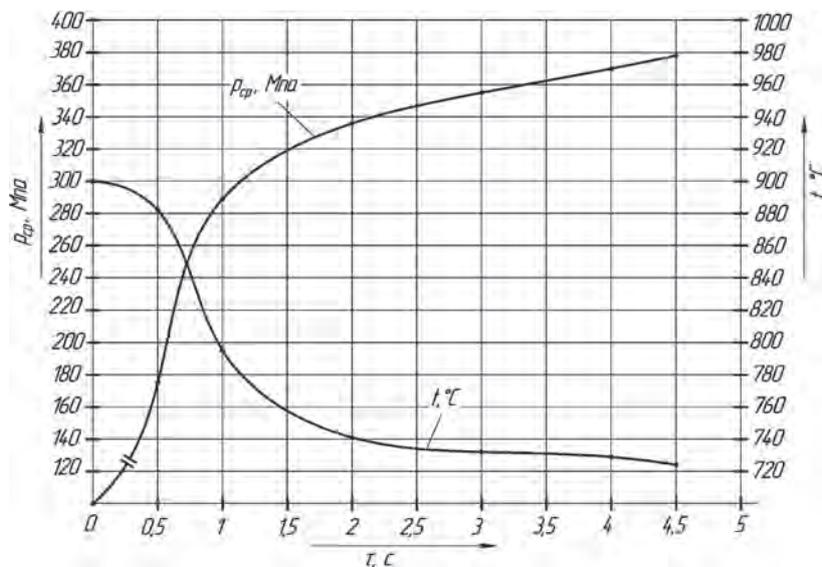


Рис. 5. Изменения среднего напряжения и температуры в течение процесса прокатки

### Выводы

1. Рассчитано падение температуры заготовки при переносе ее от места нагрева к прокатному стану. Определена необходимая температура нагрева для соблюдения условий прокатки.
2. Рассчитано значение коэффициента теплоотдачи от заготовки к валку и оправке при прокатке.
3. В результате моделирования было установлено распределение напряжений в очаге деформации.
4. Определено падение температуры заготовки в очаге деформации по мере протекания процесса прокатки.

### Литература

1. Исаевич Л. А. Технология изготовления полосовых заготовок переменной толщины с использованием локального изгиба / Л. А. Исаевич, В. А. Король, М. И. Сидоренко, Д. М. Иваницкий, В. И. Пушкевич // Материалы международной научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БНТУ. Минск: БНТУ, 2013. С. 343.
2. ГОСТ 1203-75. Чека тормозной колодки для вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. М., 1975. 6 с.
3. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. М.: Metallurgiya, 1980. 320 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
5. Логачев М. В. Расчеты нагревательных устройств / М. В. Логачев, Н. И. Иваницкий, Л. М. Давидович. Минск: БНТУ, 2007. 160 с.

### References

1. Isaevich L. A. Tehnologiya izgotovleniya polosovyh zagotovok peremennoi tolschiny s ispolzovaniem lokalnogo izgiba [Manufacturing techniques of variable thickness strips with use of a local bend]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoy konferencii profesorov, prepodavatelei, nauchnyh rabotnikov, aspirantov i studentov BNTU* [Materials of the international scientific and technical conference of professors, teachers, scientists and graduate students]. Minsk, BNTU Publ., 2013, p. 343.
2. GOST 1207-75. Cheka tormoznoi kolodki dlya vagonov zheleznih dorog kolei 1520 mm. Tehnicheskie usloviya [GOST 1207-75 A brake shoe pin of railway transport with the length of track 1520 mm. Technical conditions]. Moscow, 1975, 6 p.
3. Tselikov A. I., Nikitin G. S., Rokotyan S. E. *Teoriya prodolnoi prokatki* [The theory of the rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 320 p.
4. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 600 p.
5. Logachev M. V., Ivanickiy N. I., Davidovich L. M. *Raschety nagrevatelnyh ustroystv* [Calculation of heating means]. Minsk, BNTU Publ., 2007, 160 p.