

УДК 621.771

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОЛОСЫ НА ОСНОВЕ МАССОТЕПЛОПЕРЕНОСА

Сергей Александрович Берестнев⁽¹⁾, Юрий Львович Захаров⁽²⁾

*Студент 6 курса⁽¹⁾, студент 6 курса⁽²⁾,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: В.М.Синицкий,
доктор технических наук, лауреат Государственной премии СССР, премии Совета
Министров СССР, профессор кафедры «Оборудование и технологии прокатки»*

1. Введение.

Для прокатки полос из быстрорежущих и труднодеформируемых марок стали АХК «ВНИИМЕТМАШ» был разработан и изготовлен прокатный стан 200 ЭКН, успешно эксплуатируемый на заводе «Ижсталь». [1] Нагрев полосы перед прокаткой обеспечивается за счет тепловыделения электрического тока, пропускаемого по участку между токоподводящей и прокатной клетями непосредственно в процессе прокатки.

При постоянной скорости прокатки на участке нагрева устанавливается стационарное температурное поле, параметры которого зависят от поперечного сечения полосы, расстояния между клетями, скорости прокатки, значений теплоемкости и омического сопротивления прокатываемого материала при изменяемой температуре, потерь тепла во внешнюю среду. Следует учитывать, что зависимости теплоемкости материала и его омического сопротивления от температуры выражаются нелинейными функциями. [2]

Математическое выражение процесса массотеплопередачи описывается известными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных. Их решения выполняются численными методами на основе конечно-элементных схем [2,4], в то же время, получая точные решения для конкретных случаев, не удастся наглядно найти взаимные физические связи между исходными данными, определяющими процесс нагрева движущейся полосы.

Ниже излагается методика, которая с достаточной практической точностью предлагает схему расчета с разбиением участка нагрева на ряд укрупненных отрезков, внутри которых принимаются усредненные значения заданных параметров.

В этом примере расчета принято разбиение участка нагрева на 4 отрезка, каждый из которых нагревается по сравнению с соседним на одну и ту же температуру (0 – 200°C; 200 – 400°C; 400 - 600°C; 600 - 800°C). (рис.1)

Окончание нагрева на уровне 800 °С с учетом разогрева металла от работы деформации в прокатной клетке оказывается достаточным для прокатки труднодеформируемых сплавов, т.е. рассматривается режим «теплой прокатки».

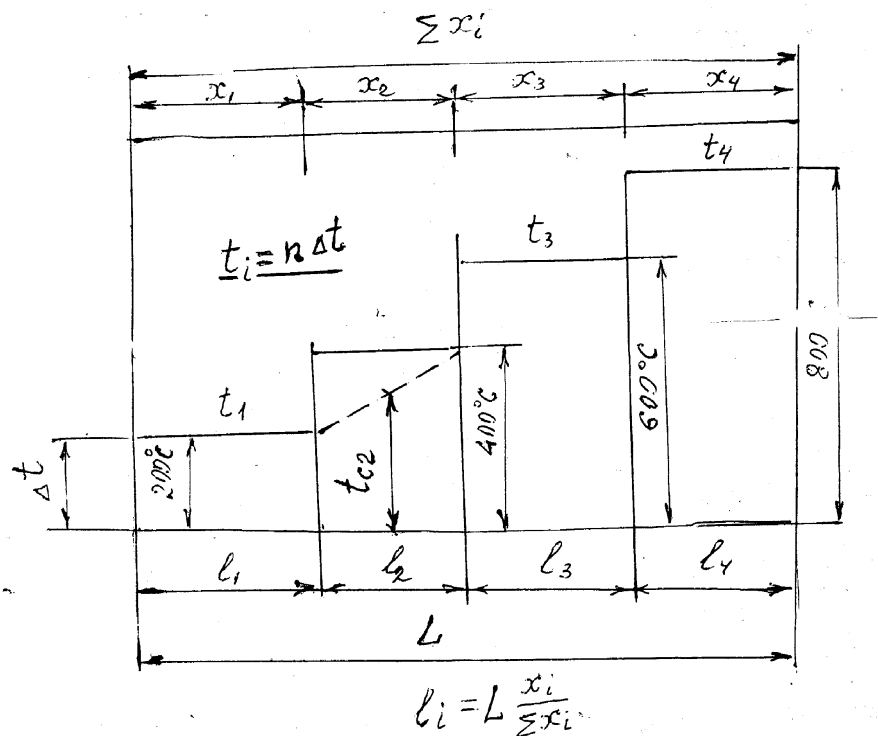


Рис.1 Схема разбивки участка нагрева полосы на отрезки
Относительные длины x_i
Фактические длины отрезков участка нагрева длиной l_i
Интервал изменения температуры Δt

Отметим, что каких-либо ограничений для применения предлагаемой схемы расчета при разбиении участка нагрева на большее количество и на большую конечную температуру не существует.

Поскольку на каждом отрезке регламентируется температура нагрева, то результатом тепловых расчетов становится определение длины этих участков, при этом сумма длин отрезков приравнивается к длине участка нагрева. В этом сущность рассматриваемой методики.

Расчет проводится со следующими допущениями:

- теплопередача между отрезками на участке нагрева не учитывается ввиду кратковременности процесса;
- теплосодержание материала предыдущего отрезка переходит на последующий отрезок без потерь (вместе с перемещенной массой);
- теплоотдача во внешнюю среду, рассчитанная для каждого отрезка, учитывается в общей мощности нагрева в виде дополнения.

Рассмотрим конкретно выполненный расчет для случая низкоуглеродистой стали типа Ст20 и его результаты сравним с конечными результатами расчетов для 2 марок высоколегированной стали Р18 и Х6ВФ. Исходные данные для расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	Параметр	Обозначение и размерность	Ст20	P18	X6ВФ
1	Ширина ленты	$B, м$	0,1	0,1	0,1
2	Толщина ленты	$h, м$	0,005	0,005	0,005
3	Площадь сечения	$S, м^2$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
4	Плотность	$\eta, \frac{кг}{м^3}$	7850	8700	8100
5	Средняя теплоемкость в диапазонах до 100°C 0 – 200°C 200 – 400°C 400 - 600°C 600 - 800°C	$C, \frac{дж}{кг \cdot град}$ C_1 C_2 C_3 C_4	485 510 525 580 630	414 436 468 555 676	414 436 468 555 676
6	Удельное электрическое сопротивление при $t = 20^\circ C$	$\rho, мкОм \cdot м$	0,097	0,405	0,290
7	Температурный коэффициент изменения сопротивления	$\alpha, \frac{1}{^\circ C}$	$6,57 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
8	Длина участка нагрева	$L, м$	1,1	1,1	1,1

Примечание: Данные для стали Ст20 – см [3],
для стали P18 и X6ВФ – см [4]

2. Расчет нагрева движущейся полосы.

2.1. Схема нагрева ленты (рис. 1)

В отличие от принятых схем расчета с разбиением участка нагрева на равные по длине отрезки, выберем другую схему, по которой этот участок разбит на равные по приращению температуры отрезки. Их длина будет искомой величиной расчета.

Длина участка нагрева L равна расстоянию между контактирующими валами токоподводящей и прокатной клетями.

Скорость движения полосы составляет v , (м/с)

2.2. Время нагрева полосы на отрезке x_i

$$\tau_i = \frac{x_i}{v}, (с)$$

2.3. Масса полосы на рассматриваемом отрезке

$$M_i = Bhx_i\eta = Sx_i\eta, (кг)$$

где B – ширина полосы, м;

h – толщина полосы, м;

x_i – длина отрезка, м;

S – площадь сечения полосы, $м^2$;

η – плотность материала полосы, $кг/м^3$.

2.4. Температура металла полосы в конце отрезка – t_i , ($^\circ C$).

Средняя температура на отрезке

$$t_{ci} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, (^\circ\text{C})$$

2.5. Электрическое сопротивление отрезка

$$R_i = \rho (1 + \alpha t_{ci}) \frac{x_i}{S}, (\text{Ом})$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом · м

α – температурный коэффициент.

2.6. Количество выделенной теплоты

$$Q_i = J^2 \rho (1 + \alpha t_{ci}) \frac{x_i^2}{Sv}, (\text{дж})$$

что следует из формулы $Q = J^2 R_i \tau_i$.

2.7. Количество теплоты, необходимой для нагрева полосы на выделенном отрезке до средней температуры этого отрезка

$$Q_i^H = Sx_i \eta t_{ci} c_i, \text{дж}$$

где c_i – теплоемкость материала в данном температурном диапазоне.

2.8. Баланс теплоты с учетом тепломассопереноса с предыдущего участка на последующий выражается в виде

$$J^2 \rho (1 + \alpha t_{c(i+1)}) \frac{x_{i+1}^2}{Sv} = Sx_{i+1} \eta t_{c(i+1)} c_{i+1} - Sx_i \eta t_{ci} c_i \quad (1)$$

По полученной рекуррентной форме (1) производится определение относительных длин отрезков участка нагрева.

2.9. Расчет относительных длин отрезков x_i

Первый отрезок (средняя температура 100°C)

$$x_1 = \frac{S^2 v \eta t_{c1} c_1}{J^2 \rho (1 + \alpha t_{c1})} = \frac{S^2 v}{J^2} \cdot \frac{7850 \cdot 100 \cdot 500}{9,7 \cdot 10^{-8} (1 + 6,57 \cdot 10^{-3} \cdot 100)}$$

$$x_1 = 24,42 \frac{S^2 v}{J^2} \cdot 10^{14} \quad (2)$$

Второй отрезок (средняя температура 300°C)

$$x_2^2 - \frac{S^2 v \eta t_{c2} c_2}{J^2 \rho (1 + \alpha t_{c2})} x_2 + \frac{S^4 v^2 \cdot 24,42 \cdot 10^{14} \eta t_{c1} c_1}{J^4 \rho (1 + \alpha t_{c2})} = 0 \quad (3)$$

Подставив числовые значения, имеем:

$$x_2^2 - 42,9 \cdot 10^{14} \frac{S^2 v}{J^2} \cdot x_2 + 332,6 \cdot 10^{28} \frac{S^4 v^2}{J^4} = 0$$

Решая квадратное уравнение, находим, что (квадратный корень в формуле решения уравнения берется со знаком «минус» по физическим соображениям)

$$x_2 = 10,16 \frac{S^2 v}{J^2} \cdot 10^{14} \quad (4)$$

Аналогично последовательно находятся значения для x_3 и x_4 .

$$\text{В результате получим, что } x_3 = 6,18 \frac{S^2 v}{J^2} \cdot 10^{14} \text{ и } x_4 = 4,8 \frac{S^2 v}{J^2} \cdot 10^{14}. \quad (5)$$

Обозначим значения коэффициентов при $\frac{S^2 v}{J^2} \cdot 10^{14}$ через φ_i .

$$\text{Тогда } x_i = \varphi_i \frac{S^2 v}{J^2} \cdot 10^{14}. \quad (6)$$

$$\Sigma \varphi_i = 24,42 + 10,16 + 6,18 + 4,8 = 45,56 \quad (7)$$

Поскольку значения x_i найдены на основе энергетических зависимостей без привязки к длине участка, то необходимо выполнить «масштабирование» и определить фактические длины l_i , сумма которых составит L .

Сумма значений x_i из (2), (4), (5) с учетом коэффициентов φ_i приводит к выражению

$$10^{14} \cdot \frac{S^2 v}{J^2} \cdot \Sigma \varphi_i = L \quad (8)$$

Из (8) следует

$$\frac{S^2 v}{J^2} = \frac{L}{10^{14} \cdot \Sigma \varphi_i} = \frac{L}{10^{14} \cdot 45,56} \quad (9)$$

Подстановка (8) соответственно в (2), (4), (5) определяет

$$l_i = L \frac{\varphi_i}{\Sigma \varphi_i} \quad (10)$$

Таким образом, определяются значения $l_1 = 0,536L$, $l_2 = 0,223L$, $l_3 = 0,136L$, $l_4 = 0,105L$ для рассматриваемого случая нагрева.

По найденным значениям длин отрезков, которым соответствуют граничные температуры 200°C; 400°C; 600°C; 800°C строится график распределения температур по длине участка нагрева. (рис.2)

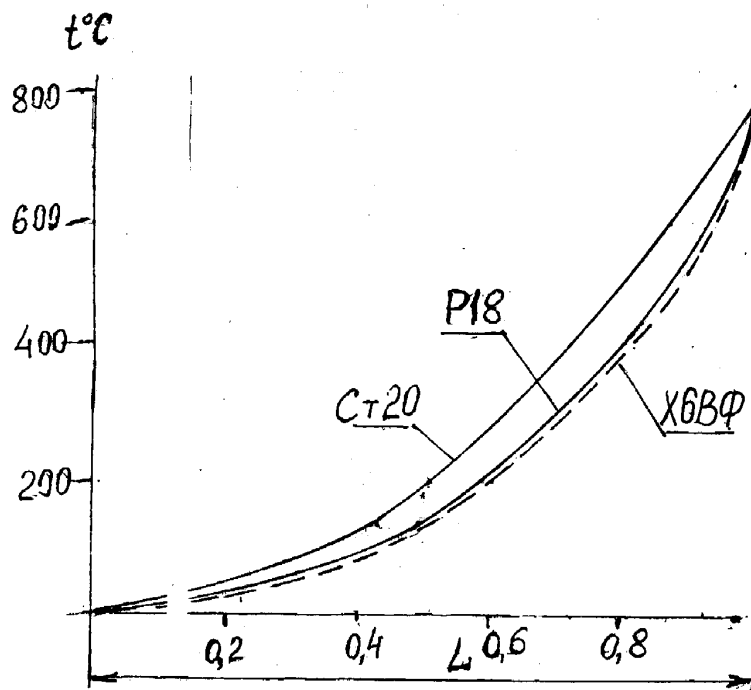


Рис.2 Распределение температуры нагрева полосы вдоль участка нагрева.

1 – Ст20; 2 – P18; 3 – X6BФ

3. Определение электрических параметров.

3.1. Сила тока нагрева. Формула (9) дает возможность расчета тока нагрева

$$J^2 = 45,56 \cdot 10^{14} \frac{S^2 v}{L}$$

Таким образом, в данном случае

$$J = 6,75 \cdot 10^7 S \sqrt{\frac{v}{L}}, \text{ ампер} \quad (12)$$

Формула (12) связывает основные соотношения тока нагрева с площадью сечения полосы, скоростью её движения и длиной участка нагрева. Коэффициент k в этой формуле определился на основании учета плотности материала полосы, значения её сопротивления в холодном состоянии и при нагреве, теплоемкости, конечной температуры нагрева 800°C и принятом разбиении участка нагрева на 4 отрезка.

Коэффициент k будет иметь другие значения для конкретных марок стали, заданной максимальной температуры нагрева и выбора количества отрезков на участке нагрева. Расчеты показывают, что увеличение числа отрезков повышает точность вычислений, но существенного изменения из-за усреднения учитываемых параметров в общей количественной оценке искомых величин не происходит.

Определение коэффициента k производится по изложенной выше методике для каждого конкретного случая.

3.2. Определение электрического сопротивления нагретой полосы, напряжения тока нагрева и необходимой мощности для низкоуглеродистой стали. Общее сопротивление нагретой полосы определяется в виде

$$R = \frac{\rho}{S} \sum l_i (1 + \alpha t_{ci}), \text{ Ом} \quad (13)$$

Учитывая, что $l_i = \frac{\varphi_i L}{\sum \varphi_i}$, то

$$R = \frac{\rho L}{S} \sum \frac{\varphi_i}{\sum \varphi_i} (1 + \alpha t_{ci}) \quad (14)$$

При значениях $\frac{\varphi_i}{\sum \varphi_i}$, равных соответственно 0,536; 0,223; 0,136; 0,105, и t_{ci} отрезков 100°C ; 300°C ; 500°C ; 700°C

$$\sum \frac{\varphi_i}{\sum \varphi_i} (1 + \alpha t_{ci}) = 2,73 \quad (15)$$

Таким образом

$$R = 2,73 \frac{\rho L}{S}, \text{ Ом} \quad (16)$$

Напряжение тока нагрева

$$V = JR = 6,75 \cdot 10^7 \rho \sqrt{vL} \cdot \sum \frac{\varphi_i}{\sum \varphi_i} (1 + \alpha t_{ci}), \text{ В} \quad (17)$$

или с учетом (15), (16)

$$V = JR = 18,43 \cdot 10^7 \rho \sqrt{vL}, \text{ В} \quad (18)$$

Мощность нагрева

$$N = JV = 45,56 \cdot 10^{14} \rho S v \cdot \sum \frac{\varphi_i}{\Sigma \varphi_i} (1 + \alpha_{ci}), \text{ Вт} \quad (19)$$

$$N = 124,3 \cdot 10^{11} \rho S v, \text{ кВт} \quad (20)$$

4. Сводные результаты расчетов некоторых сталей.

Выполнив аналогичные расчеты нагрева до 800°C движущейся ленты для марок стали P18 и X6ВФ (см. табл.1), сведем результаты в табл.2.

Таблица 2

Параметр	Ст20	P18	X6ВФ
Ток нагрева $J, \text{ А}$	$6,75 \cdot 10^7 S \sqrt{\frac{v}{L}}$	$3,58 \cdot 10^7 S \sqrt{\frac{v}{L}}$	$4,81 \cdot 10^7 S \sqrt{\frac{v}{L}}$
Напряжение $V, \text{ В}$	$18,43 \cdot 10^7 \rho \sqrt{vL}$	$5,11 \cdot 10^7 \rho \sqrt{vL}$	$6,73 \cdot 10^7 \rho \sqrt{vL}$
Мощность $N, \text{ кВт}$	$124,3 \cdot 10^{11} \rho S v$	$18,33 \cdot 10^{11} \rho S v$	$32,4 \cdot 10^{11} \rho S v$
Длины отрезков нагрева до температуры			
200°C	0,536L	0,602L	0,605L
200 – 400°C	0,223L	0,213L	0,210L
400 - 600°C	0,136L	0,115L	0,113L
600 - 800°C	0,105L	0,069L	0,067L
Омические сопротивления участка нагрева до температуры входа в прокатную клеть	$R = 2,73 \frac{\rho L}{S}$ $\rho = 0,097,$ $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ $\alpha = 6,57 \cdot 10^{-3},$ $\frac{1}{1^\circ \text{C}}$	$R = 1,43 \frac{\rho L}{S}$ $\rho = 0,405,$ $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ $\alpha = 1,86 \cdot 10^{-3},$ $\frac{1}{1^\circ \text{C}}$	$R = 1,4 \frac{\rho L}{S}$ $\rho = 0,290,$ $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-3},$ $\frac{1}{1^\circ \text{C}}$
Пример: для стана 200 ЭКН, где $L = 1,1 \text{ м}$, если $S = 0,0005 \text{ м}^2$, $v = 1 \text{ м/с}$			
$J, \text{ кА}$	32,2	17,06	22,93
$V, \text{ В}$	18,75	21,75	20,47
$N, \text{ кВт}$	604*	371	469

* превышает мощность источника питания

5. Потери на излучение и конвективный теплообмен.

5.1. Потери на излучение. Известно, что потери на излучение определяются коэффициентом излучения

$$E = \varepsilon C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad [3]$$

где $C_o = 5,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, ε = коэффициент черноты,

T – абсолютная температура, ° К.

Для принятых отрезков участка нагрева со средними для них температурами выражения $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ будут иметь значения соответственно 193, 1078, 3570, 8963.

Поверхности излучения, полученные в расчетах, близки к значениям соответственно 0,12; 0,048; 0,03; 0,022 м².

Общая мощность потерь на излучение будет составлять для полосы около 1 кВт, что может не учитываться.

5.2. Потери на конвективный теплообмен.

Плотность теплового потока

$$q = \alpha(t_{II} - t_o),$$

где t_{II} – температура тела,

t_o – температура среды.

Поток тепла $Q = qF$

Принимая максимальное значение $\alpha = 30$ ккал/м² час град, [3]

т.е. 35,5 Вт/м²·с·град, среднюю температуру полосы около 500 °С, площадь охлаждения 0,2 м², можно оценить расходуемую мощность 35,5·0,2·500=3500 Вт, или 3,5 кВт, что составляет примерно 1 % от мощности нагрева.

Эти потери, также как потери в токоподводящей сети и в контактной системе, целесообразно учитывать в общем к.п.д., который составит 0,95 – 0,97.

6. Заключение. Полученные расчетные формулы имеют общий вид для нагрева различных марок стали и определяют сходный вид распределения температуры по длине участка нагрева движущейся полосы. Существенное влияние на мощность нагрева оказывают сопротивление материала полосы в холодном состоянии и значение температурного коэффициента. Для материалов с низким омическим сопротивлением, хорошо проводящих электрический ток, такой метод нагрева малоэффективен (сравним сопоставимый нагрев медных и алюминиевых проводов).

С другой стороны, высокоуглеродистые и высоколегированные стали по своим физическим характеристикам позволяют с большой эффективностью использовать эффект электроконтактного нагрева, позволяющий существенно снизить при прокатке сопротивление деформирования, повысить свойства пластичности, а из-за малости времени нагрева движущейся полосы избежать проблемы её окисления при нагреве до высокой температуры. Ни о чем образом, не отрицая высокой точности расчетов нагрева движущейся полосы на основе методов конечно-элементного анализа, предлагаемых авторами этой статьи схема расчета ускоряет оценку конструкторских проработок и целесообразность принимаемых решений.

Литература

1. Пасечник Н.В. Прокатка инструментальных сталей на станах с электроконтактным нагревом // Черметинформация. – 1996. – вып.2. – с. 55-58.
Пасечник Н.В. Расчет электроконтактного нагрева широкой полосы при её движении через токопроводящие клетки // Тяжелое машиностроение. – 1998. - № 5 – 6. – с. 16 – 21.
2. Пасечник Н.В. Разработка теоретических основ, создание новых технологий и оборудования для прокатки лент и полос из труднодеформируемых металлов и сплавов. Автореферат докт. диссертации. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000 г. С.32.
3. Справочник машиностроителя. Т.2. Машгиз. М. 1960г. С. 433,462.