

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПРОКАТКИ И ОХЛАЖДЕНИЯ КАТАНКИ НА СОВРЕМЕННОМ МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ**

Мелкосортно-проволочный стан 150, построенный в 2009 г. в ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» (г. Березовский) [1], включает методическую печь, двухниточные непрерывные черновую и промежуточную группы в составе 13 клетей и две однопоточные линии, в каждой из которых установлены предчистовые консольные клетки, петлевой участок с камерами принудительного водяного охлаждения раската, чистовой 10-клетевой блок, устройство двухстадийного регулируемого охлаждения катанки типа Стелмор и оборудование для формирования и отделки бунтов готового проката (рис. 1). Стан предназначен для производства катанки диаметром 5,5–9,0 мм и круглой гладкой и периодической стали диаметром до 22 мм широкого марочного сортамента и различного назначения (низкоуглеродистая катанка для прямого волочения, сварочная, арматурная, кордовая, канатная, рессорная и др.).

Различие технических требований на механические свойства катанки широкого назначения обуславливает необходимость разработки и применения специальных режимов термомеханической обработки раската, которые в основном определяются изменением температуры металла в процессе производства. Поэтому создание математической модели температурных режимов прокатки, позволяющей управлять механическими свойствами проката различного назначения, является весьма актуальной задачей.

Такая модель должна включать три основных расчетных модуля:

- изменения температуры предварительно нагретой заготовки в процессе прокатки в рабочих клетях стана;
- снижения температуры раската в трубчатых камерах водяного охлаждения перед и за чистовым блоком клетей;
- охлаждения катанки вентиляторным воздухом на виткоукладчике и роликовом транспортере.

Ниже приведено содержание каждого модуля.

При расчете изменения температуры металла в процессе сортовой прокатки обычно учитывают потери тепла излучением и разогрев металла за счет перехода механической энергии пластической деформации в тепловую энергию [2; 3]. При прокатке полосы с площадью поперечного сечения  $\omega$ , периметром  $L$  и начальной температурой  $t_0$  изменение температуры за один проход составляет [2]:

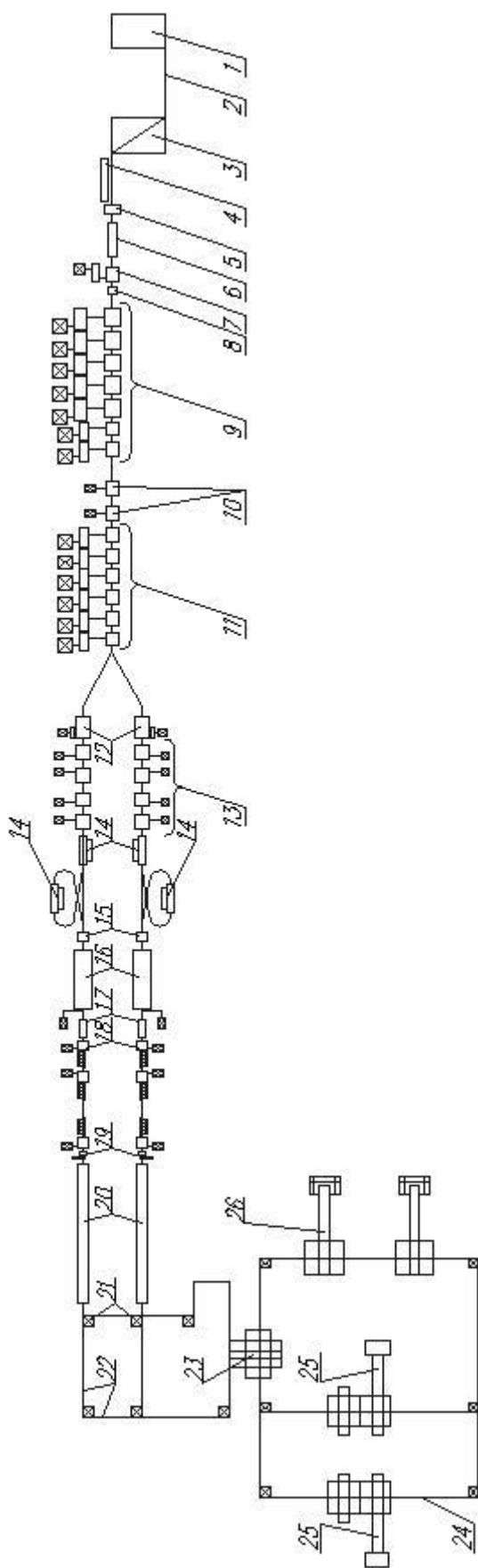


Рис. 1. Схема расположения оборудования мелкосортно-проволочного стана 150: 1 – загрузочная решетка;

2 – рольганг загрузочный; 3 – печь нагревательная; 4 – стол для отбраковки заготовок; 5 – гидросбив окулины;

6 – термостат; 7 – трайбаппарат; 8 – ножницы; 9 – черновая группа клетей; 10 – ножницы обрезные;

11 – промежуточная группа клетей; 12 – ножницы обрезные; 13 – предчистовая группа клетей (4×2); 14 – линия предварительного водяного охлаждения; 15 – ножницы обрезные; 16 – чистовой проволочный блок; 17 – линия водяного охлаждения проката; 18 – трайбаппарат; 19 – виткоукладчик; 20 – млиния воздушного охлаждения проката; 21 – виткосборник; 22 – линия транспортировки бунтов; 23 – передаточная тележка бунтов; 24 – крюковой конвейер бунтов; 25 – установка подпрессовки и обвязки бунтов; 26 – разгрузочная тележка бунтов

$$\Delta t = t_0 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255 \Pi \tau}{\omega} + \left( \frac{1000}{t_0 + \Delta t_{\partial} + 273} \right)^3}} + 273; \Delta t_{\partial} = 0,183 \sigma \ln \lambda, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время охлаждения раската при прокатке и перемещении к следующей клетки;  $\Delta t_{\partial}$  – повышение температуры раската в процессе прокатки;  $\sigma$  – сопротивление металла деформации, определяемое по методу термомеханических коэффициентов [4 и др.];  $\lambda$  – коэффициент вытяжки. При заданной температуре нагрева заготовки и известной калибровке валков стана можно рассчитать температуру раската в каждом проходе:

$$t_{1i} = t_{0i} - \Delta t_i \quad (2)$$

где  $i$  – номер прохода в группе клетей,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ .

Описанная методика реализована в экспертной системе (ЭС) «Технология сортовой прокатки» [5; 6], которую применили для моделирования температурных режимов прокатки в непрерывных группах клетей мелкосортно-проволочного стана.

Снижение температуры раската в камерах принудительного водяного охлаждения определили исходя из уравнения теплового баланса, согласно которому количество тепла, отдаваемое металлом, равно количеству тепла, поглощаемого водой [7]. При охлаждении раската с начальной температуры  $t_n$  до конечной температуры  $t_k$  секундное количество тепла, отдаваемого металлом составляет:

$$Q_1 = \omega V \rho C_c (t_n - t_k), \quad (3)$$

где  $V$  – скорость движения раската;  $\rho$  и  $C_c$  – плотность и теплоемкость стали.

Секундное количество тепла, поглощаемого водой при нагреве ее от начальной температуры  $t_{вн}$  до конечной  $t_{вк}$ , рассчитывается по формуле:

$$Q_2 = C_в m (t_{вк} - t_{вн}), \quad (4)$$

где  $C_в$  – теплоемкость воды,  $m$  – масса воды (секундный объем в литрах).

Приравнявая выражения (3) и (4) и проводя несложные преобразования, получили следующую формулу для расчета снижения температуры раската в камерах принудительного охлаждения:

$$t_n - t_k = \frac{C_в w k (t_{вк} - t_{вн})}{3,6 \omega V \rho C_c}, \quad (5)$$

где  $w$  – расход охлаждающей воды в камерах по показаниям расходомеров ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $k$  – коэффициент эффективности работы камеры, связанный с потерями воды на отсечку и утечку. Экспериментально установлено, что  $k = 0,75 \div 0,80$ .

Формула (5) позволяет путем изменения расхода воды  $w$  управлять снижением температуры раската  $\Delta t_p = t_n - t_k$  и определять температуру

полосы при выходе из камеры  $t_k = t_n - \Delta t_p$ , или при заданном снижении температуры  $\Delta t_\delta$  определять необходимый расход воды  $w$ .

На участке воздушного охлаждения (рис. 2) катанка виткообразователем раскладывается на роликовом транспортере, состоящем из 20 секций с регулируемой скоростью в пределах от 0,09 до 1,00 м/с. Над роликовым транспортером установлены теплоизолирующие экраны (крышки), которые могут быть подняты (открыты) или опущены (закрыты). Общее количество экранов равно 31. Соотношение закрытых и открытых экранов позволяет регулировать скорость охлаждения слоя витков катанки. Под роликовым транспортером размещено 19 воздушных вентиляторов, причем интенсивность подачи воздуха на витки регулируется количеством включенных вентиляторов. Шаг раскладки витков на роликовом транспортере зависит от конечной скорости прокатки  $V_k$  и скорости транспортера  $V_T$ .

$$S = V_T D \left( \frac{1}{V_T} - \frac{\pi}{V_k} \right),$$

где  $D$  – диаметр витка ( $D \approx 1100$  мм). Толщина слоя разложенных (перекрывающихся) витков катанки диаметром  $d$  составляет  $h_g = \frac{D}{S} d$ .

Модель воздушного охлаждения катанки на указанном участке базируется на определении лучистой и конвективной передачи тепла в окружающее пространство. При этом удельный тепловой поток (количество тепла, теряемое в единицу времени единицей поверхности раската) при открытых экранах рассчитывается по закону Ньютона [3; 9]:

$$q = \alpha_\Sigma (T_\Pi - T_C), \quad (6)$$

где  $\alpha_\Sigma = \alpha_K + \alpha_L$  – суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией ( $\alpha_K$ ) и излучением ( $\alpha_L$ );  $T_\Pi$  – температура поверхности раската;  $T_C$  – температура окружающей среды.

Коэффициент теплопередачи излучением в соответствии с законом Стефана – Больцмана [8]

$$\alpha_L = \frac{C_{ПРИВ} \left[ \left( \frac{T_\Pi}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_C}{100} \right)^4 \right]}{T_\Pi - T_C}, \quad (7)$$

где  $C_{ПРИВ}$  – приведенный коэффициент излучения системы «раскат – окружающая среда».

Коэффициент теплопередачи конвекцией  $\alpha_E$  рассчитывают с использованием критериев Нуссельта  $Nu$  и Рейнольдса  $Re$

$$\alpha_K = Nu \frac{\lambda_g}{R}, \quad Nu = 0,18 Re^{0,62} \psi, \quad Re = \frac{w_g d}{\nu}. \quad (8)$$

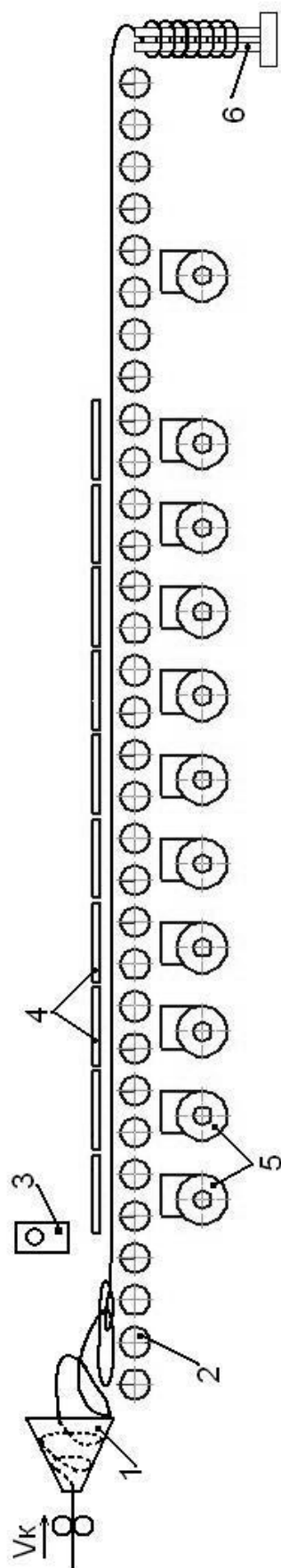


Рис. 2. Схема расположения оборудования на участке воздушного охлаждения: 1 – виткообразователь; 2 – роликовый транспортер; 3 – пирометр; 4 – теплоизолирующие экраны; 5 – воздушные вентильаторы; 6 – шахта виткосборника

где  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $R$  – характерный размер раската в поперечном сечении;  $\psi$  – функция угла атаки (обычно  $\psi = 0,5$  [8]);  $w_{\text{в}}$  – скорость потока воздуха;  $d$  – приведенный диаметр раската;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

При найденном значении  $q$  падение теплосодержания  $\Delta i$  за произвольный промежуток времени  $\Delta \tau$  составит [8]

$$\Delta i = \frac{qk\Delta \tau}{R\rho}, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент материальной нагрузки ( $k = 1$  для пластины,  $k = 2$  для цилиндра).

С другой стороны падение теплосодержания  $\Delta i$  можно представить как разницу теплосодержаний в начале  $i_0$  и в конце  $i_1$  промежутка времени  $\Delta \tau$

$$\Delta i = i_0 - i_1 = T_0 C_0 - T_1 C_1, \quad (10)$$

где  $T_0$  и  $T_1$  – температура поверхности раската в начале и в конце промежутка времени  $\Delta \tau$ ;  $C_0$  и  $C_1$  – теплоемкость стали при  $T_0$  и  $T_1$  соответственно.

Из выражений (9) и (10) следует, что

$$T_1 = \left( T_0 C_0 - \frac{qk\Delta \tau}{R\rho} \right) \frac{1}{C_1} \quad (11)$$

С использованием формул (6) – (11) разработали алгоритм и программу конечно-разностного моделирования процесса охлаждения слоя катанки на участке транспортера от виткоукладчика до первого закрытого теплосохраниющего экрана (программу «Воздушное охлаждение»). При этом время перемещения витков последовательно по каждой секции транспортера разделяли на достаточно малые отрезки  $\Delta \tau = 0,8 - 1,2$  с. Исходная для расчетов температура катанки на виткоукладчике может быть задана или предварительно рассчитана по рассмотренной выше методике с использованием формул (1) – (5). Скорость потока воздуха при отключенных вентиляторах принимали равной скорости движения витков катанки по роликовому транспортеру, а при работающих вентиляторах рассчитывали в зависимости от расхода воздуха  $m_{\text{в}}$  и площади диффузора вентилятора  $F_{\text{д}}$  по формуле

$$w_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}}}{F_{\text{д}}} k,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости потока воздуха из-за препятствий в виде роликов и других деталей транспортера.

Теплоемкость стали в зависимости от температуры принимали по данным работы [9].

Конечным результатом расчетов по разработанной программе является температура витков катанки перед участком закрытых теплозащитных экранов –  $t_3$ .

Для определения закономерностей охлаждения катанки под теплозащитными экранами провели экспериментальное исследование на стане 150, в результате которого установили, что температура витков катанки в процессе движения на этом участке транспортера описывается уравнением

$$t_6 = t_3 \exp(-0,00105\tau), \quad (12)$$

где  $\tau$  – продолжительность охлаждения катанки под закрытыми крышками.

С учетом изложенного выше алгоритм моделирования температурного режима на стане 150 состоит из следующих операций.

1. При заданных размерах заготовки и конечного профиля, марке стали, температуре нагрева заготовки (температуре начала прокатки), калибровке валков и режиме деформации металла по программам ЭС «Технология сортовой прокатки» рассчитывают изменение температуры раската в черновой, промежуточной и предчистовой группах клетей, в результате чего определяют температуру раската перед камерой предварительного охлаждения –  $t_n$ .

2. С учетом опыта работы стана принимают ориентировочный расход воды  $w$  в камере предварительного охлаждения и по формулам (5) рассчитывают понижение температуры раската в этой камере  $\Delta t_p = t_n - t_k$ , а также конечную температуру  $t_k = t_n - \Delta t_p$ , являющуюся исходной для расчета изменения температуры в чистовом блоке клетей.

3. С применением ЭС «Технология сортовой прокатки» рассчитывают температурный режим деформации металла в блоке клетей, который, как правило, характеризуется повышением температуры катанки к концу прокатки. Расчетную конечную температуру раската в блоке  $t_{кб}$  принимают за исходную при последующем принудительном охлаждении катанки.

4. Рассчитывают по формуле (5) понижение температуры катанки в камерах окончательного водяного охлаждения аналогично тому, как указано в пункте 2. Температура  $t_k$  конца охлаждения в этих камерах соответствует температуре катанки на виткообразователе и является исходной для расчета воздушного охлаждения катанки.

5. По разработанной программе «Воздушное охлаждение» рассчитывают изменение температуры витков катанки на открытой части роликового транспортера, в результате чего определяют температуру катанки перед первым закрытым теплозащитным экраном  $t_3$ . Затем определяют длительность замедленного охлаждения катанки под закрытыми экранами и по формуле (12) рассчитывают температуру бунта катанки в виткосборнике.

6. Оценивают полученные значения температуры катанки на виткоукладчике  $t_k$ , перед закрытыми экранами  $t_3$  и в виткосборнике  $t_6$  с точки зрения получения требуемой структуры и механических свойств катанки и в случае несоответствия условиям их получения корректируют рассчитан-

ный температурный режим путем изменения, например, температуры нагрева заготовки, расхода воды в камерах предварительного и окончательного охлаждения, конечной скорости прокатки, количества включенных вентиляторов или расхода вентиляторного воздуха, скорости роликового транспортера, количества закрытых теплозащитных экранов и т.п. При измененных параметрах проводят повторные расчеты по изложенному алгоритму и таким образом управляют температурным режимом прокатки с целью получения заданных свойств проката.

На рис. 3 представлен рассчитанный по разработанной методике температурный режим прокатки катанки диаметром 5,5 мм из стали марки Св 08АА, с конечной скоростью 100 м/с, предназначенной для прямого волочения.

Нагретая до температуры  $t_0 = 1065$  °С заготовка при прокатке в черновой группе клетей охлаждалась на 45 °С. В промежуточной группе клетей температура раската начала увеличиваться и в предчистовой группе возросла до 1020 °С. Для понижения ее до  $t = 960$  °С потребовался расход воды в камере предварительного охлаждения  $w = 80$  м<sup>3</sup>/ч. При дальнейшей прокатке в чистовом блоке клетей температура катанки возросла до 1025 °С. Для понижения ее до требуемой температуры на виткоукладчике 930 °С расход воды в камерах установки Стелмор составил 142 м<sup>3</sup>/ч. Охлаждение витков катанки на открытой части роликового транспортера моделировали при скорости секций от 0,32 до 0,34 м/с с расходом вентиляторного воздуха 58 м<sup>3</sup>/с. В результате установлено, что температура витков катанки перед первым закрытым теплозащитным экраном составила  $t_s = 740$  °С. Охлаждение витков катанки под закрытыми экранами (25 штук) происходило в течении  $\tau = 202$  с. При этом расчетная температура катанки на виткооборнике составила 490 °С.

На рис. 3 показаны результаты измерения температуры раската на отдельных участках стана при помощи стационарного лазерного пирометра типа SOLOnet SN21 и переносного инфракрасного термометра типа Кельвин-компакт 1200. Расхождение расчетных и измеренных значений температуры не превышает 15 °С.

Расчетный температурный режим обеспечил получение в структуре катанки ферритно-перлитной смеси при бальности зерна не выше 7 и требуемые значения относительного сужения  $[\psi] \geq 70$  % (фактически 80–83 %) при временном сопротивлении разрыву  $[\sigma_B] \leq 520$  МПа (фактически 365–380 МПа).

При моделировании режимов прокатки кордовой катанки Ø5,5 мм из стали 70 установлено, конечная скорость прокатки не может превышать 77 м/с из-за чрезмерного разогрева раската в проволочном блоке клетей. При указанной предельной скорости температура на виткообразователе составила 950° С.



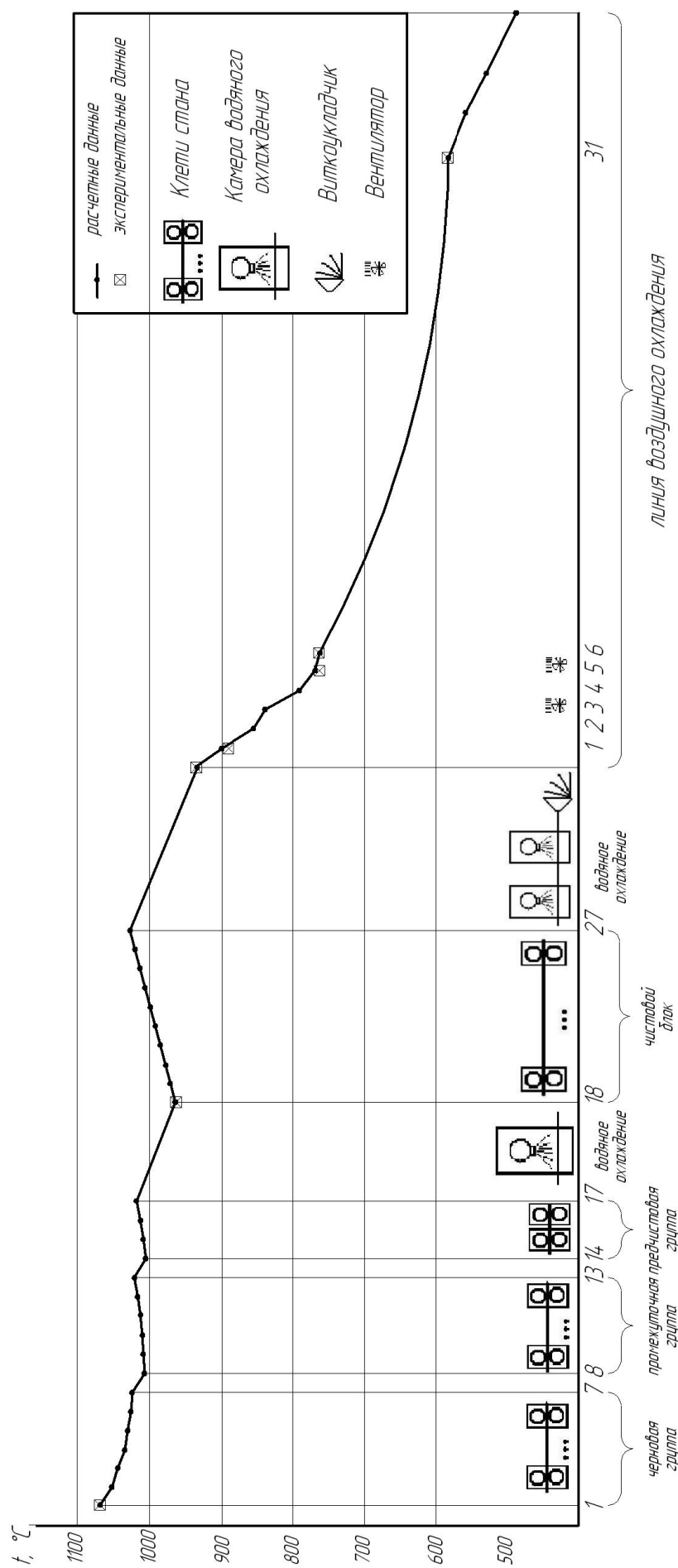


Рис. 3. Температурный режим прокатки катанки  $\varnothing 5,5$  мм из стали Св 08АА: цифрами на оси абсцисс обозначены: на участке стана – номера клетей; на линии воздушного охлаждения – номера теплозащитных экранов

Охлаждение на воздушном участке роликового транспортера проводили при всех открытых теплоизолирующих экранах с целью получения высоких прочностных характеристик при оптимальных пластических свойствах. В результате температура на виткосборнике составила 385 °С.

### **Выводы**

1. Разработана математическая модель расчета температурных режимов при производстве катанки и мелкосортной стали на современных мелкосортно-проволочных станах, снабженных устройствами для принудительного водяного и воздушного охлаждения.

2. Созданная математическая модель реализована в виде комплекса программ и позволяет определять параметры температурных режимов прокатки и охлаждения раската, обеспечивающие получение требуемых механических свойств катанки различного назначения из сталей широкого марочного сортамента.

3. С использованием полученной модели разработаны технологические режимы прокатки катанки на новом мелкосортно-проволочном стане 150 ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» (филиал «Березовский»).

### **Список использованных источников**

1. Пономарев А.А., Гурбан Е.С., Шилов В.А. Новый мелкосортно-проволочный стан. // Производство проката. 2010. № 8. С. 13–15.

2. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. М.: Теплотехник, 2010. 490 с.

3. Жучков С.М., Кулаков Л.В., Лохматов А.П. Управление температурным режимом непрерывной сортовой прокатки (Теоретические и технологические основы). М.: Теплотехник, 2008. 144 с.

4. Зюзин В.И., Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением : справочник. Челябинск: Металл, 1993. 368 с.

5. Куделин С.П., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Экспертная система технологии сортовой прокатки // Программные продукты и системы. 2000. № 3. С. 35–39.

6. Шилов В.А., Смирнов В.К., Эйдензон В.М. Новое поколение САПР технологии сортовой прокатки // Сталь. 2001. № 4. С. 36–38.

7. Яловой Н.И. Тепловые процессы при обработке металлов давлением / Н.И. Яловой, М.А. Тылкин, П.И. Полухин, Д.И. Васильев. М.: Высшая школа, 1973. 631 с.

8. Михеев М.А., Михеева Н.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

9. Гордон Я.М. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Я.М. Гордон, Б.Ф. Зобнич, М.Д. Казяев [и др.] М.: Металлургия, 1993. 368 с.