

## Инженерный метод расчёта температурного режима прокатки на толстолистовых станах и станах Стеккеля

Предложено обобщенное уравнение расчёта изменения температуры прокатки на толстолистовых станах, которое учитывает влияние следующих факторов: потери тепла излучением и конвекцией за время пауз между проходами; отдачи тепла рабочим валкам; повышения теплосодержания за счёт энергии пластической деформации, работы сил трения в зоне контакта раскат валок; потери тепла под действием попадающей на поверхность металла воды гидросбивов, воды, охлаждающей валки и валковую арматуру, из-за контактного теплообмена с роликами рольгангов и деталями рабочих клетей. При расчёте по предлагаемому уравнению достигается погрешность в расчётах не более 1 % в сопоставлении с экспериментальными данными, полученными на стане 3000 ПАО «ММК им. Ильича».

**Ключевые слова:** температурный режим, проход, уравнение, толстолистовой стан, поправочный коэффициент, стан Стеккеля

В последнее время станы Стеккеля начали применять не только для прокатки тонких горячекатаных полос, но и для получения толстых листов, что ещё больше расширяет их технологическую гибкость [1]. Станы Стеккеля в составе литейно-прокатных агрегатов позволяют сгруппировать весь технологический процесс, начиная от разливки стали до готового проката всего в одном агрегате [2]. Одна из возможных схем показана на рисунке.

Целью данной работы является разработка простого, оперативного метода расчёта температурных параметров прокатки листов и полос толщиной 5-50 мм на толстолистовых станах, а также на участках стана Стеккеля: выход полосы из моталки – рабочая клеть – вход полосы в моталку.

При выводе уравнения для расчёта температуры по линии указанных станов учитывали следующие факторы: потери тепла излучением и конвекцией, время транспортировки от печи к стану и время пауз между проходами; отдачу тепла рабочим валкам; повышение теплосодержания за счёт энергии пластической деформации, работы сил трения в зоне контакта полоса валок и экзотермических реакций окисления. Кроме того, раскат теряет тепло под дей-

ствием попадающей на его поверхность воды гидросбивов, воды, охлаждающей валки и валковую арматуру, из-за контактного теплообмена с роликами рольгангов и деталями рабочих клетей.

На основе рассмотренных методик расчёта температурных условий прокатки [3-9] выведено обобщённое уравнение изменения температуры металла при прокатке, учитывающее все указанные выше составляющие теплового баланса:

$$\Delta t = \frac{k \cdot (t_0 / 1000)^4 \cdot \tau \cdot v + 500n}{h_1 \cdot v} - 0,294 \cdot p_{cp} \cdot \lg\left(\frac{h_i}{h_{i+1}}\right),$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий марку стали и неучтённые переменные факторы, получаемый по результатам экспериментальных исследований;  $t_0$  – начальная температура поверхности полосы, °С;  $h_i$  – толщина полосы до прохода, мм;  $h_{i+1}$  – толщина полосы после прохода, мм;  $t$  – время прохода, с;  $v$  – скорость прокатки металла, м/с;  $n$  – число секций гидросбива;  $p_{cp}$  – среднее нормальное контактное напряжение, МПа.

С целью проверки достоверности разработанного и обобщённого уравнения изменения температуры

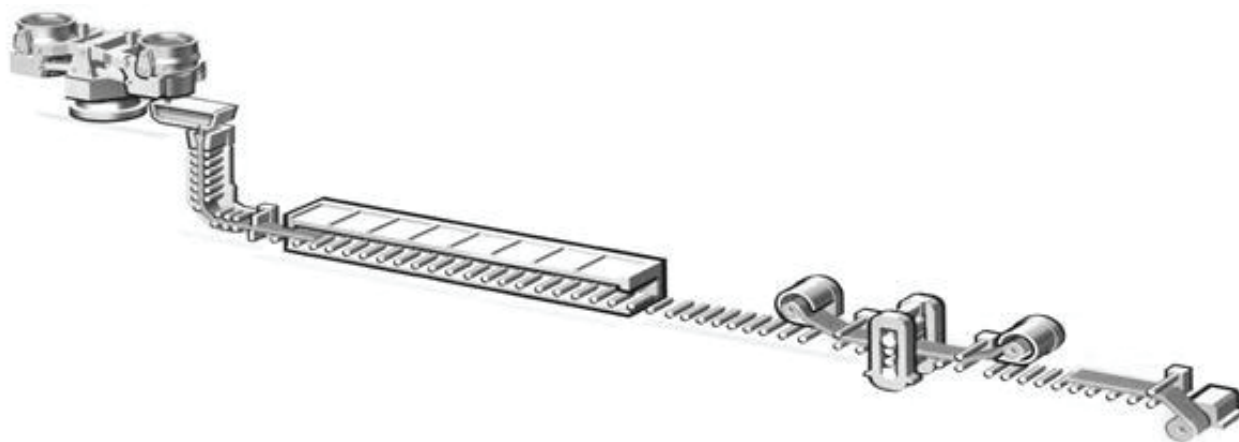


Схема расположения основного оборудования литейно-прокатного агрегата со станом Стеккеля

## Результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных

Данные	Значения температуры металла по проходам, °С					$t_p^*$ , °С
	1	2	3	4	5	
Ст3сп (6x2000x6000 мм)						
Эксперимент	1051	1042	1002	932	854	789
Расчётное	1051	1034,81	992,95	932,71	861,22	782,17
Погрешность	0	0,69	0,9	-0,08	-0,84	0,87
Сталь 50 (6x2000x6000 мм)						
Эксперимент	1045	1032	1005	929	824	752
Расчётное	1045	1033,81	1004,86	928,06	827,12	756,46
Погрешность	0	-0,17	0,01	0,10	-0,38	-0,59
Ст3сп (10x1500x6000 мм)						
Эксперимент	1026	1025	1008	973	923	866
Расчётное	1026	1023,23	1001,27	963,73	915,42	858,82
Погрешность	0	0,17	0,67	0,95	0,82	0,83
Сталь 17Г1С (10x2000x6000 мм)						
Эксперимент	1001	990	970	935	884	839
Расчётное	1001	990,37	968,91	936,51	886,93	838,65
Погрешность	0	-0,04	0,11	-0,16	-0,33	0,04
Ст3сп (12x2000x6000 мм)						
Эксперимент	975	973	967	937	889	860
Расчётное	975	973,30	967,60	936,96	896,50	850,97
Погрешность	0	-0,03	-0,06	0,00	-0,84	1,05
Сталь 17Г1С (12x2000x6000 мм)						
Эксперимент	925	920	915	895	852	819
Расчётное	925	921,62	910,28	889,36	858,53	823,84
Погрешность	0	-0,18	0,52	0,63	-0,77	-0,59
Ст3сп (25x2000x6000 мм)						
Эксперимент	907	906	903	901	894	881
Расчётное	907	907,66	904,17	899,44	892,52	884,54
Погрешность	0	-0,18	-0,13	0,17	0,17	-0,40
Ст3сп (30x2000x6000 мм)						
Эксперимент	884	877	875	870	866	860
Расчётное	884	879,22	875,80	871,12	863,86	855,63
Погрешность	0	-0,25	-0,09	-0,13	0,25	0,51
Ст3сп (40x2000x6000 мм)						
Эксперимент	878	879	874	876	878	874
Расчётное	878,00	879,30	878,10	876,47	872,81	869,24
Погрешность	0,00	-0,03	-0,47	-0,05	0,59	0,54
Сталь 17Г1С (50x2000x6000 мм)						
Эксперимент	816	820	816	815	810	809
Расчётное	816,00	816,35	815,09	813,81	811,26	808,42
Погрешность	0,00	0,45	0,11	0,15	-0,16	0,07

\* $t_p$  – температура раската по оптическому пирометру за чистой клетью

металла проведены экспериментальные исследования в чистой клетке стана 3000 ПАО «ММК им. Ильича».

Размерный сортамент стана 3000 ( $h = 6-50$  мм) близок к сортаменту современных станов Стекла. Исходной заготовкой для производства листов на стане 3000 служат в основном непрерывнолитые слябы следующих размеров: толщиной – 150-315 мм, шириной – 1100-1850 мм, длиной – 2300-2850 мм из

углеродистых, конструкционных, низколегированных и легированных марок стали.

Технические характеристики чистой клетки  
 Диаметр опорных валков, мм. . . . . 2100  
 Диаметр рабочих валков, мм. . . . . 1000  
 Мощность двигателя, кВт. . . . . 2x11200  
 Ступени скоростей главного привода, об/мин. . . . 0-80-125

Толщина раската после черновой клетки (толщина подката) должна быть в 2,5-3,0 раза больше номинальной толщины листа. Допустимая сила прокатки 70 МН.

Поскольку стан 3000 является специализированным в основном на контролируемых режимах прокатки, то важно строго выдерживать заданный температурный режим прокатки по технологической линии стана.

Получение требуемой температуры конца прокатки достигается:

– выдерживанием раската на охлаждающем устройстве (байпасе);

– изменением скорости прокатки;

– охлаждением подката на рольганге между клетями.

При исследовании для измерения температуры раскатов использовали стационарно установленные оптические пирометры фирмы «Siemens» типа «Ардокол» (диапазон 600-1100 °С и погрешность  $\pm 0,5\%$  от  $t_{\text{макс}} + 1$  °С).

В проведённых экспериментах охвачен широкий диапазон размеров листов, а также наиболее распространённые марки стали на стане 3000 ПАО «ММК им. Ильича».

Результаты экспериментального исследования позволили получить для условий стана 3000 значения коэффициента:  $k = 29,3$  – для мало- и среднеуглеродистых марок стали;  $k = 27,3$  – для низко- и легированных марок стали.

С учётом этих значений сделана оценка точности расчёта температуры по уравнению и данным эксперимента (таблица).

В таблице в первом проходе в качестве расчётного значения температуры принято значение, полученное при эксперименте. Это начальная температура металла (подката) при задаче в валки чистовой клетки.

Толщину раската измеряли толщиномером типа МГП (от 0 до 90 мм и погрешностью  $\pm 0,15$  мм),

скорость прокатки измерялась исходя из окружной скорости валков привода чистовой клетки, время прокатки определяли по данным ЭВМ, взятым с сервера АСУ ТП стана 3000.

Среднее нормальное напряжение металла  $p_{\text{cp}}$  рассчитывали по силе прокатки, постоянно фиксируемой месдозой.

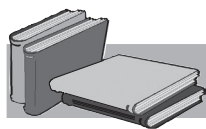
Из таблицы видно, что при расчёте по уравнению погрешность для листов толщиной от 6 до 50 мм, прокатанных в чистовой клетке стана 3000, не превышает 1 %, в большинстве случаев составляет не более 0,5 %.

Полученные результаты показывают, что уравнение с указанными значениями коэффициента  $k$  даёт возможность для конкретного стана 3000 выполнять расчёты температуры металла с высокой точностью, что важно при изменении условий прокатки, получения новых марок стали, модернизации оборудования и т. п.

При использовании предлагаемого метода для нового стана Стеккеля следует брать значения коэффициента  $k$ , полученные для стана 3000, а при эксперименте на новом стане уточнить для него значение коэффициента  $k$ .

## Выводы

Для цеховых работников и специалистов технических служб промышленного предприятия для каждого стана (а они работают по многу лет) следует иметь простой метод расчёта основных параметров прокатки. В данной статье это показано на примере нового метода расчёта температурного режима прокатки. Новое уравнение изменения температуры металла при прокатке учитывает все составляющие теплового баланса, а погрешность расчётов близка к погрешности измерительного прибора, использованного при эксперименте. Следовательно, оправдано использование нового уравнения для расчётов температурных режимов прокатки на толстолистовых станах и станах Стеккеля.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Чемпион Н. Дж.* Современная технология производства толстых листов на стане Стеккеля / Н. Дж. Чемпион // Чёрные металлы. – 2004. – № 2. – С. 79-84.
2. *Салганик В. М.* Исследование переходных режимов стана Стеккеля в составе совмещенного литейно-прокатного агрегата / В. М. Салганик, И. А. Селиванов, А. С. Карандаев // Изв. вузов. Чёр. металлургия. – 1998. – № 3. – С. 35-39.
3. *Коновалов Ю. В.* Расчёт параметров листовой прокатки. Справочник. / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. М.: Металлургия. – 1986. – 430 с.
4. *Сафьян М. М.* Прокатка широкополосной стали / М. М. Сафьян – М.: Металлургия. 1969. – 460 с.
5. *Ключников А. Д.* Теплопередача излучением в огнетехнических установках / А. Д. Ключников, Г. П. Иванцов. – М.: Энергия, 1970. – 169 с.
6. *Lee P. W.* A method for predicting temperature in continuous hot strip mills / P. W. Lee, R. B. Sims, N. Wright – Iron and Steel. – 1962. – v.35. – № 14. – P. 624-627.
7. Исследование непрерывного широкополосного стана 2000 / И. М. Меерович, И. В. Франценюк, Ю. Д. Железнов и др. – Сталь. – 1977. – № 2. – С. 18-20.
8. *Шварцер И.* Температурный режим при прокатке широкой полосы / И. Шварцер // Чёрные металлы. 1977. – № 21. – С. 3-8.
9. *Коновалов Ю. В.* Пути решения температурной задачи прокатки / Ю. В. Коновалов, А. С. Хохлов // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. 2012. – № 2 (31). – С. 185-188.

## Анотація

Хохлов О. С.

### Інженерний метод розрахунку температурного режиму прокатки на товстолистових станах і станах Стеккеля

Запропоновано узагальнююче рівняння розрахунку зміни температури прокатки на товстолистових станах, яке враховує вплив наступних чинників: втрати тепла випромінюванням і конвекцією за час пауз між проходами; віддачі тепла робочим валкам; підвищення тепловмісту за рахунок енергії пластичної деформації, роботи сил тертя в зоні контакту розкат валок; втрати тепла під дією потрапляння на поверхню металу води гідрозбиву, води, що охолоджує валки і валковуарматуру, через контактний теплообмін з роликми рольгангів і деталями робочих клітей. При розрахунку за запропонованим рівнянням досягається похибка в розрахунках не більше 1% в порівнянні з експериментальними даними, отриманими на стані 3000 ПАТ «ММК ім. Ілліча».

## Ключові слова

температурний режим, прохід, рівняння, товстолистовий стан, поправочний коефіцієнт, стан Стеккеля

## Summary

Khokhlov A.

### Engineering approach to calculation of temperature conditions of rolling on plate mills and Steckel mills

The generalized equation of rolling temperature dynamic analysis for plate mills is proposed. It takes into account the influence of following factors: heat loss by radiation and convection during the interpass pauses; heat output to working rolls; increase of heat storage at the expense of plastic deformation, work of friction forces in the contact zone; heat loss under action of descale water, cooling water for rolls and roll fitting, by the contact heat exchange with gravity conveyor rolls and working stand details. The error during the calculation using this equation is less than 1% in comparison with the experimental data obtained on the «3000» mill of PJSC «Ilyich iron and steel works».

## Keywords

temperature conditions, pass, equation, plate mill, coefficient, Steckel mill

Поступила 11.06.2015