

УДК 621.771

Коновалов Ю. В.
Хохлов А. С.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАДАЧИ ПРОКАТКИ

При прокатке в чистовой клети снижение температуры раската существенно зависит от толщины готовых листов (до 16–20 мм). Свыше указанных толщин снижение температуры при прокатке металла в чистовой клети практически не зависит от толщины листов.

Для углеродистых и низколегированных сталей температура конца прокатки должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить измельчение и рекристаллизацию структуры до образования равномерного зерна необходимых размеров, и в то же время она должна быть достаточно низкой для предупреждения роста зерна после последних обжатий [1].

Такие условия возникают при окончании прокатки в диапазоне температур 780–920 °С, что обеспечивает мелкое зерно и высокие механические свойства металла [2].

Изменение температуры металла при прокатке происходит из-за потерь тепла излучением и конвекцией за время транспортировки от печи к стану и за время пауз между проходами [3]; отдачи тепла рабочим валкам; повышения теплосодержания за счет энергии пластической деформации, работы сил трения в зоне контакта полоса валок и экзотермических реакций окисления. Кроме того, раскат (сляб) теряет тепло под действием попадающей на его поверхность воды гидросбивов, воды, охлаждающей валки и валковую арматуру, из-за контактного теплообмена с роликами рольгангов и деталями рабочих клетей [4].

Степень влияния перечисленных факторов на тепловой режим прокатки различна. Качественная и количественная их оценки определяются характером теплообменных процессов, возможностью достаточно строгого их математического описания, а также учетом и контролем технологических параметров, которые определяют интенсивность теплообмена.

Целью работы является поиск путей решения температурной задачи прокатки и главная задача состоит в том, чтобы разработать математическую модель расчета температурного режима и создание общей формулы изменения температуры прокатки по проходам.

Снижение температуры вследствие излучения ($\Delta t_{изл}$) и конвекции ($\Delta t_{к}$) рассчитаем по уравнению М. М. Сафьяна, которое учитывает влияние температуры металла на величину теплоемкости и плотности. Оно имеет следующий вид [5]:

$$\Delta t_{изл} = k \times \frac{T_0}{1000} \tau / h , \quad (1)$$

где T_0 – температура поверхности и центра сечения охлаждаемой полосы, °С;
 k – коэффициент, который учитывает влияние температуры на плотность ρ и теплоемкость c ; для углеродистой стали $k = 19,5$; для легированной $k = 17,5$;
 h – толщина охлаждаемой полосы, мм;
 τ – время охлаждения полосы, с.

$$\Delta t_{к} = 0,07 \times \Delta t_{изл} . \quad (2)$$

Ввиду определенных трудностей описания условий теплоотдачи в системе полоса-пар-вода, расчет изменения температуры прокатки вследствие воздействия гидросбива предлагают [6, 8, 9] выполнять соответственно по следующим эмпирическим зависимостям:

$$\Delta t_{зсб} = \frac{500}{hv} , \quad (3)$$

где h – толщина металла под гидросбивом, мм;

v – линейная скорость металла в зоне гидросбива, м/с.

Повышение температуры за счет энергии деформации рассчитываем с помощью формулы Ю. Д. Железнова и Б. А. Цифриновича [7]:

$$\Delta t_{\partial} = 0,42 \times p_{cp} \times \lg\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (4)$$

где p_{cp} – среднее нормальное контактное напряжение, которое рассчитывается по следующей формуле:

$$p_{cp} = 1,15 \sigma_T \times n_{\sigma}, \quad (5)$$

где σ_T – сопротивление деформации,

n_{σ} – коэффициент напряженного состояния. [10]

Для расчета теплопередачи рабочим валкам используем формулу П. В. Ли, Р. Б. Симса и Х. Райта [8]:

$$\Delta t_{\partial} = 0,3 \times \Delta t_{\partial} + 17,5. \quad (6)$$

Нами была выведена обобщающая формула изменения температуры металла при прокатке учитывающая все вышеперечисленные факторы:

$$\Delta t = k_B + \frac{k_p \times (t_0 + 273) \times \tau \times v + 500}{h_1 \times v} - 0,294 \times p_{cp} \times \lg\left(\frac{h_0}{h_1}\right), \quad (7)$$

где $k_p = 0,021$ – для углеродистых сталей;

$k_p = 0,019$ – для легированных сталей;

$k_B = 7,5$ – коэффициент учитывающий отдачу тепла валкам.

На стане 2300 ПАО «Донецкий металлургический завод», выполнен эксперимент с измерением температуры после каждого четного прохода и толщины раската в каждом проходе. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента на стане 2300

Первый проход		Второй проход		Третий проход		Четвертый проход		Пятый проход		Шестой проход		Седьмой проход	
T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h*, мм
1112	36,6	-	27,7	1070	20,6	-	15,3	1060	10,7	-	9,3	1000	8,4
1116	37,1	-	27,6	1093	20,5	-	15,6	1065	11	-	9,1	995	8,3
1114	36,5	-	27,7	1090	20,6	-	15,5	1077	10,6	-	9,1	1000	8,3
1110	36,9	-	27,7	1085	20,3	-	15,5	1060	10,7	-	9,4	991	8
1118	36,6	-	27,1	1097	20,1	-	15,5	1073	11	-	9,1	1000	8,4
1120	36,9	-	27,3	1087	20,5	-	15,2	1070	10,6	-	9,5	1000	7,9

h* – Толщина готового листа в горячем состоянии.

Измерения выполнены для условий чистовой клетки при толщине подката 42 мм. Для измерений параметров в эксперименте были использованы следующие средства измерительной техники:

- Оптический пирометр типа ПВ6-213 гр. ДГ-13, диапазон работы 600–1300 °С;
- Измеритель толщины.

С учетом полученных экспериментальных данных выполнена оценка результатов расчета изменения температуры по методу, разработанному Г. П. Иванцовым (8) и по предложенному уравнению (7) для прокатки листов толщиной 8 мм и начальной температуры прокатки 1116, 1110 и 1120 °С (см. табл. 1).

$$\Delta t = t_0 + 273 \times \frac{1000}{\sqrt[3]{1000 / ((t_0 + 273) / 100)^3 + 0,55 \tau / h}} \quad (8)$$

Результаты расчета, а также ошибка формулы представлены в табл. 2

Таблица 2

Результаты расчета температурного режима по формуле Г. П. Иванцова

	Первый проход		Второй проход		Третий проход		Четвертый проход		Пятый проход		Шестой проход		Седьмой проход	
	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h, мм	T, °C	h*, мм
Э	1116	37,1	-	27,6	1093	20,5	-	15,6	1065	11	-	9,1	995	8,3
И	1116	37,1	1115	27,6	1113	20,5	1109	15,6	1103	11	1091	9,1	1075	8,3
%	-	-	-	-	1,83	-	-	-	3,57	-	-	-	8	-
Р	1116	37,1	1104	27,6	1094	20,5	1080	15,6	1062	11	1037	9,1	999	8,3
%	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,28	-	-	-	0,4	-
Э	1110	36,9	-	27,7	1085	20,3	-	15,5	1060	10,7	-	9,4	991	8
И	1110	36,9	1109	27,7	1107	20,3	1103	15,5	1097	10,7	1085	9,4	1070	8
%	0	-	-	-	2	-	-	-	3,5	-	-	-	8	-
Р	1110	36,9	1098	27,7	1087	20,3	1074	15,5	1056	10,7	1031	9,4	993	8
%	0	-	-	-	0,1	-	-	-	0,38	-	-	-	0,2	-
Э	1120	36,9	-	27,3	1087	20,5	-	15,2	1070	10,6	-	9,5	1000	7,9
Р	1120	36,9	1119	27,3	1117	20,5	1113	15,2	1107	10,6	1094	9,5	1079	7,9
%	0	-	-	-	2,76	-	-	-	3,46	-	-	-	7,9	-
Р	1120	36,9	1108	27,3	1098	20,5	1084	15,2	1066	10,6	1041	9,5	1003	7,9
%	0	-	-	-	1	-	-	-	0,37	-	-	-	0,3	-
Э – экспериментальные данные. И – расчет по уравнению Иванцова (8). Р – расчет по новому предложенному уравнению (7). % – ошибка расчетных данных по отношению к эксперименту.														

Из табл. 2 видно, что при расчете по уравнению (8) погрешность в третьем проходе находится в пределах 1,83–2,76 %, в пятом проходе 3,46–3,57 %, в седьмом проходе 7,9–8 %, а по предложенному новому уравнению (7) в третьем проходе находится в пределах 0,1–1 %, в пятом проходе 0,28–0,38 % и в седьмом проходе 0,2–0,4 %.

ВЫВОДЫ

Температура металла при прокатке является одной из основных технологических характеристик. Температуру начала прокатки в общем случае стремятся иметь как можно выше, с учетом теплофизических характеристик металла. При таких температурах металл имеет высокие пластические свойства и затраты энергии на прокатку минимальны.

При прокатке листов и полос из углеродистой и некоторых низкоуглеродистых марок сталей существенное влияние на структуру стали и, следовательно, на механические свойства металла оказывают температура конца прокатки, температура смотки полосы в рулоны, величина обжатия в последних проходах, а также скорость деформации.

Температура конца прокатки должна быть не менее 860 и не более 920 °С, потому что она обеспечивает мелкое зерно и высокие механические свойства металла.

Предложенное уравнение для расчета изменения температуры прокатки толстых листов дает значительно меньшую погрешность, чем уравнение Г. П. Иванцова, широко используемое для условий прокатки толстых листов и полос.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Н. Т. Влияние прерванной закалки в роликовой машине на механические свойства толстых листов / Н. Т. Егоров, А. Ф. Страшко, Г. Г. Мостовенко // *Термическая и термомеханическая обработка проката : тематический отраслевой сборник (МЧМ СССР)*. – М. : Металлургия, 1981. – С. 15–17.
2. Долженков Ф. Е. Повышение качества толстых листов / Ф. Е. Долженков, Ю. В. Коновалов, В. Г. Носов [и др.]. – М. : Металлургия, 1984. – 247 с.
3. Коновалов Ю. В. Новые схемы прокатки на станах с печными моталками / Ю. В. Коновалов, А. С. Хохлов, Д. А. Голощапов // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – С. 133–135.
4. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.
5. *Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство* / Сафьян М. М. [и др.]. – Киев : Вища школа, 1988. – 352 с.
6. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1998. – 240 с.
7. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. В 2 кн. Кн. 1. Производство горячекатанных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
8. Коновалов Ю. В. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко. – М. : Металлургия, 1974. – 176 с.
9. Зюзин В. И. Повышение эффективности систем гидросбива окалины с поверхности горячекатаного листа / В. И. Зюзин, М. Д. Залесов // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. – М., 1972. – С. 49–51.
10. Бровман М. Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки / М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1995. – 256 с.

Коновалов Ю. В. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Хохлов А. С. – аспирант ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: wild106@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2012 г.