

Список літератури

1. **Furman, J.E. Mauser, M.O. Butler and W.A. Stikney.** Utilization of Red Mud Residues From Alumina Production// U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 7454. – 1970.
2. **Piga, F. Pochetti and L. Stoppa.** Recovering Metals From Red Mud Generated during Alumina Production// JOM 45 (11). – 1993. - pp. 55-59.
3. **Braithwait G.B.** Patent No. 2078211 – A. (Jan. 1982).
4. **Guceione.** “Red Mud”, a Solid Waste, Can Now Be Converted To High-Quality Steel// Eng. Min. J. 172 (9). – 1972. – pp. 136-138.
5. **Vochon, R. Tyagi, J-C. Auclair and R.J. Wilkinson.** Chemical and Biological Leaching of Aluminum from Red Mud// Environ. Sci. Technol. 28 (1). – 1994. – pp. 26-30.
6. Vereinigte Aluminium-Werke. FR Patent No. 2117930 - A (Dec. 1971).
7. **Baetz, R.C. Lightbourne.** U.S. Patent No. 3690828 (Sept. 1972).
8. **B. Mishra, M. Slavic and D. Kirkpatrick.** Application of processed Red-Mud in Blast Furnaces// Proceedings the 2nd International Conference on RAMM 99. – 1999. – pp. 557-568.
9. **Корнеев В.И., Сусс А.Т., Цеховой А.Н.** Красные шламы (свойства складирование, применение). М.: Металлургия, 1991. – 144 с.
10. **Утков В.А., Мешин В.В., Ланкин В.П., Тесля В.Г.** Промышленные способы переработки красных шламов// Состояние, проблемы и направления использования в народном хозяйстве красного шлама. – Николаев. – 1999. – С. 11-13.
11. **Плотніков В.В., Ярош Т.П., Марасанова О.В.** Перспективи утилізації промислових відходів у металургійному виробництві// Вісник Криворізького національного університету. – Випуск 32. – 2012. – С. 215-219.
12. **Губіна В.Г., Кадошніков В.М.** Червоний шлам Миколаївського глиноземного заводу – цінна техногенна сировина// Геолого-мінералогічний вісник. – 2005. – № 2. – С. 122-126.
13. Промислові відходи України. Проблеми та шляхи їх вирішення/ **Т.В. Тарасова, В.Г. Губіна, Л.П. Кващук та ін.** – К.: Логос, 2011. – 199 с.
14. **Ладыгин А.В.** Использование жидкофазного восстановления для получения чугуна из красных шламов// Разработка рудных месторождений. – Выпуск 94. – 2011. – С. 217-219.
15. **Губін Г.В., Півень В.А.** Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза. – Кривий Ріг, 2010. – 336 с.
16. **Роменец В., Биласанов А.** Российская плавка// Металлы Евразии. – 2006. – № 6. – С. 70-75.

Рукопис подано до редакції 26.03.15

УДК 620.9: 621.771.065.+004.942: 621.771.065

А.А. ШЕПЕЛЬ, аспірантка, Криворізький національний університет

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ШИРОКИХ ПОЛОС

Разработана математическая модель, реализующая новую методику снижения энергозатрат для процесса горячей прокатки широких полос. Предложенная методика расчета учитывает специфику компоновки технологического оборудования непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 1700 Мариупольского металлургического комбината имени Ильича, а также размерный и марочный сортамент сталей. С учетом технологических возможностей оборудования данного широкополосного стана горячей прокатки решены программно задачи расчета энергосиловых параметров обеспечивающих требуемые показатели качества готовой полосы. Исследовано влияние легирующих элементов в наиболее используемых марках стали, что позволило скорректировать их оптимальный химический состав с учетом температурного режима прокатки. Из существующих методик для расчета сопротивления деформации использована методика, которая позволяет определить мгновенное значение сопротивления деформации в широком диапазоне химического состава сталей, охватывающем практически весь сортамент углеродистых марок стали при условиях, характерных для их горячей прокатки, а так же позволяет рассчитать сопротивление деформации в любой точке очага деформации при прокатке в зависимости от температуры, скорости и накопленной деформации в данной точке. При этом обеспечивается возможность расчета давления металла на валки и момента прокатки с использованием дифференциальных уравнений контактных напряжений, не прибегая к их аналитическому преобразованию с достаточно грубыми упрощениями.

Ключевые слова: энергосиловые параметры, широкая полоса, горячая прокатка, энергосбережение, марка стали.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Сохранение конкурентоспособности на международных рынках стали обуславливает наряду с оптимизацией технологических режимов горячей прокатки разработку и реализацию мер по снижению энергетических затрат процесса. Металлургия считается одним из главных потребителей энергии. Прокатный передел занимает 2 место, после доменного производства по затратам энергии на изго-

товление готовой продукции, причем 95% приходится на долю газа и электроэнергии, что свидетельствует об актуальности внедрения энергосберегающих технологий в металлургии, в частности при прокатке широких горячекатаных полос. Удельный расход энергии на производимую продукцию, в итоге определяют энергосиловые параметры прокатки [1-4].

Анализ исследований и публикаций. Производство широкополосной горячекатаной стали в Украине сосредоточено на ШСГП 1700 ПАО ММК им. Ильича и 1680 ПАО «Запорожсталь». На ШСГП 1700 толщина прокатываемых полос соответствует 1,5-11 мм, а ширина –1000-1540 мм.

Данный стан имеет в своем составе методические печи, а также шесть черновых и шесть чистовых рабочих клетей. С целью повышения качества поверхности полосы и уменьшения ее разнотолщинности на последних трех чистовых клетях установлены гидравлические нажимные устройства ГНУ и осевое перемещение рабочих валков, которые обеспечивают точность профиля и формы полосы соответственно требованиям международных стандартов. Техническая характеристика рабочих клетей широкополосного стана горячей прокатки 1700 Мариупольского металлургического комбината им. Ильича представлена в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика рабочих клетей ШСГП 1700 [5]

Номер клетки	Диаметр рабочих валков, мм	Диаметр опорных валков, мм	Скорость прокатки, м/с	Главный электродвигатель		Расстояние до предыдущей клетки, м
				мощность, кВт	n, об/мин	
ок	900-810		0,84	4000	600	-
1	1020-900	1450-1370	1,27	4000	600	10,15
2	1020-900	1450-1250	1,35	4000	600	18,50
3	880-810	1300-1170	1,74	4000	600	22,98
4	880-810	1300-1184	1,74	4000	600	35,42
4а	880-810	1300-1170	2,9	4000	600	53,00
5	675/665	1325/1245	1,32-2,5	8000	175-330	6
6	646/625	1325/1260	1,9-3,6	8000	175-330	5,8
7	665/646	1325/1260	3,75-8,15	8000	110-240	5,8
8	676/655	1325/1270	3,75-8,15	8000	110-240	5,8
9	692/676	1325/1270	5,95-11,2	8000	175-330	5,8
10	705/692	1325/1270	5,95-12,5	2 _{шт} ×5000	175-330	5,8

Развитие современных широкополосных станов идет по трем взаимосвязанным основным направлениям, а именно: снижение тепловых потерь при прокатке, повышение качества горячекатаных полос, в первую очередь, их точности и плоскостности [6-11].

Снижение требуемой температуры нагрева заготовок, обусловленной температурой конца прокатки, позволяет снизить расход энергоносителей непосредственно на участке нагрева. Пластичность прокатываемого материала, а, следовательно, и энергосиловые параметры процесса, то есть расход электрической энергии, потребляемой двигателями рабочих клетей прокатного стана, также непосредственно связаны с температурой прокатки. Кроме того, нестабильность температурного режима, в частности, «температурный клин» - неравномерность распределения температуры по длине полосы, вызванная повышенным охлаждением ее заднего конца по отношению к переднему - приводит к снижению точности горячекатаной металлопродукции [6,12].

Соппротивление деформации является важнейшей характеристикой деформируемой стали, которая определяет энергосиловые и кинематические параметры процесса прокатки. Величина сопротивления деформации определяется химическим составом и структурой деформируемого металла, степенью и температурно-скоростными условиями деформации [13-15].

В реальных условиях технологического процесса невозможно абсолютно точно и адекватно учесть всю доступную информацию. Повышение эффективности производственных процессов невозможно без усовершенствования и разработки новых методов моделирования.

Широкое использование в теории прокатки математических моделей позволяет предвидеть результаты внесения тех или иных изменений в технологию процесса прокатки или конструкцию стана, что позволяет выбрать оптимальный вариант решения поставленной задачи, в данном случае, снижения энергетических затрат, и свидетельствует об актуальности работы.

Постановка задачи. Целью работы является определение наиболее оптимального режима горячей прокатки с точки зрения затрат электроэнергии.

Изложение материала и результатов. Одним из основных энергосиловых параметров при термической обработке металлов является мощность прокатки. Для расчета данного параметра нами использовалась наиболее широко применяемая на практике формула [16]

$$N_{np} = \frac{M_{np} \cdot n_{об}}{0,975}, \text{ кВт} \quad (1)$$

где $n_{об}$ – число оборотов валков в минуту, об/мин; M_{np} – момент прокатки, МН·м. С другой стороны, момент прокатки может быть вычислен следующим образом: $M_{np} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_{\delta}$, МН·м, где l_{δ} – длина геометрического очага деформации, м; ψ – коэффициент плеча, показывающий, какую часть от длины очага деформации составляет плечо; $\psi = 0,498 - 0,283(l_{\delta}/h_{cp})$, при $l_{\delta}/h_{cp} = 0,5 \div 7$; h_{cp} – средняя толщина полосы мм; P – сила прокатки, МН. [16,17]

Силу прокатки определялось по формуле: $P = p_{cp} F$, где F – площадь контакта с валками, м; p_{cp} – среднее контактное нормальное давление, МПа; $p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot n_{\sigma}$ [13].

Коэффициент напряженного состояния (при $m > 2$) определяется из выражения: $n_{\sigma} = 0,75 + 0,25m$, $m = l_{\delta}/h_{cp}$.

При расчете в качестве исходной заготовки использовали сляб с параметрами 152×1420×6000 мм. Исходные данные для расчетов указаны в табл. 2

Таблица 2

Исходные данные параметров прокатки по клетям стана Параметр	Номера клетей стана												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δh_f , мм	20	45	31	17	12	10	7	3	2	1,5	1	0,5	0,5
Δh_b , мм	0	0	45	35	15	5	0	0	0	0	0	0	0
R , мм	450	475	475	440	440	440		325	325	325	325	325	325
V , м/с, согласно паспортным данным оборудования	0,84	1,27	1,35	1,74	1,74	2,9		1,32-2,5	1,9-3,6	3,75-8,15		5,95-11,2	12
L_m , м		10,15	18,50	22,98	35,42	53		6	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8

Для расчета минимальных затрат электроэнергии при прокатке полосы использован алгоритм случайного поиска (рис.1). Находим заданное количество оптимальных, с точки зрения затрат электроэнергии, по содержанию химических составляющих марок сталей.

Используя источник «Технологическая инструкция ТИ 227-П.ГЛ-21-2005 ОАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича». Производство горячекатаной листовой стали на непрерывном широкополосном стане 1700» подбираем по полученным результатам наиболее оптимальные по условиям используемого технологического режима прокатки марки стали (табл. 3).

Таблица 3

Оптимальные марки стали по условиям используемого режима прокатки

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	N
08кп	0,05 - 0,11	до 0,03	0,25 - 0,5	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,1	до 0,25	до 0,08	
10Г2С1(Д)	до 0,12	0,8 - 1,1	1,3 - 1,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	0,15 - 0,3	до 0,08	до 0,012
09Г2(Д)	до 0,12	0,17 - 0,37	1,4 - 1,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	0,15 - 0,3	до 0,08	до 0,012
Ст3сп	0,14 - 0,22	0,15 - 0,3	0,4 - 0,65	до 0,3	до 0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,3	до 0,08	до 0,008

Расчет контактного давления											
Результат Выход											
Способ задания состава стали											
<input type="radio"/> Случайный <input type="radio"/> Перебор <input type="radio"/> По мин. знач. <input type="radio"/> По макс. знач. <input checked="" type="radio"/> По средним знач. <input type="radio"/> Задать знач.											
Химический состав стали											
Хим. состав	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	V		
Процент содержание	0,575	0,825	0,790	0,150	0,025	0,025	0,150	0,140	0,130		
Энергия деформации Q = 351022,91											
Скоростная константа A = 1,089076289											
№ клетки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21.время прокатки	0,00	7,99	13,70	13,21	20,36	18,28	0,00	2,33	1,61	1,13	0,81
22.Δ-падение температуры	0,00	5,19	13,16	18,86	38,51	44,33	0,00	14,04	13,29	12,53	12,31
23.Т-температура выхода	1200,00	1194,80	1181,60	1162,80	1124,30	1079,90	1079,90	1065,90	1052,60	1040,10	1027,80
24.Ерз-относит.деформация	0,14	0,42	0,44	0,36	0,37	0,46	0,53	0,36	0,34	0,36	0,34

Рис. 1. Окно изображения программы для вычисления энергосиловых параметров (контактного давления)

Для расчета сопротивления деформации σ_s использована эмпирическая формула (2), которая позволяет определить мгновенное значение сопротивления деформации в широком диапазоне химического состава сталей, охватывающем практически весь сортамент углеродистых марок стали при условиях, характерных для их горячей прокатки. Данная методика позволяет рассчитать сопротивление деформации в любой точке очага деформации при прокатке в зависимости от температуры, скорости и накопленной деформации в данной точке. При этом обеспечивается возможность расчета давления металла на валки и момента прокатки с использованием дифференциальных уравнений контактных напряжений, не прибегая к их аналитическому преобразованию с достаточно грубыми упрощениями [14]

$$\sigma_s = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \left\{ \frac{2\varepsilon_x - \varepsilon_p}{\varepsilon} \exp\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_x}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_x}\right) \right] - \exp\left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x}\right) \right\}, \quad (2)$$

где $\sigma_y = 51,23(Z/A)^{0,133}$ - установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации; $\sigma_p = 72,22(Z/A)^{0,133}$ - максимальное сопротивление деформации; $\varepsilon_p = 0,236(Z/A)^{0,109}$ - логарифмическая деформация максимума деформационного упрочнения; $\varepsilon_x = 0,194(Z/A)^{0,109}$ - относительная деформация, соответствующая началу динамической рекристаллизации; $Z = u \cdot \exp(Q/8,318T)$ - комплексный температурно-скоростной параметр (8,318 Дж·моль⁻¹К⁻¹ - универсальная газовая постоянная); T - температура деформации, К; u - скорость деформации, с⁻¹; Q - энергия активации деформации.

Для расчета текущей температуры металла, проходящего через i -ю клетку использовалась следующая формула [12]

$$T_i = T_0 - \left[T_0 + 273 - \left(1000 / \sqrt[3]{\frac{1000}{\left(\frac{t+273}{100}\right)^3 + 0,055 \frac{\tau}{H_i}}} \right) \right],$$

где τ - время прокатки, с; H_i - толщина полосы перед клетью, мм.

Энергия активации деформации вычисляется по формуле

$$Q = 308700 + 37100 \ln(C\%) + 10900 \ln(C\%)^2 + 2700(Si\%) + 8100(Mn\%) + 337100(Cr\%) + 249900(Ni\%) - 119230(Cu\%) + 180850(V\%) - 288100(P\%) - 855000(S\%),$$

где $\varepsilon = \ln(h_0/h_1)$ логарифмическая относительная деформация; $A = 0,146 \cdot \exp(9,1 \times 10^{-5} Q)$ - скоростная константа деформируемой стали.

Данная методика расчета применима при прокатке сталей следующего химического состава:

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	V
0,05-1,1	0-1,65	0,03-1,55	≤0,3	≤0,05	≤0,05	≤0,3	≤0,28	≤0,26

Расчет мощности						
Выход						
№ клетки	0	1	2	3	4	5
1. Р-усилие прокатки, МН*м	7,02	16,65	15,98	12,88	13,28	17,96
2. Кзi-коэфф плеча	0,48	0,46	0,45	0,45	0,44	0,41
3. Мпр-момент прокатки, МН*м	0,64	2,24	1,75	0,99	0,84	0,98
4. Nпр-мощность прокатки, кВт	392,4	1378,8	1074,1	612,2	517,5	605,1
Суммарная мощность 5101,3						

Рис. 2. Окно программы для расчета мощности прокатки

Выводы и направления последующих исследований.

Предложенная методика расчета учитывает специфику компоновки технологического

оборудования непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 1700 ММК им. Ильича, а также размерный и марочный сортамент сталей.

С учетом технологических возможностей оборудования данного широкополосного стана горячей прокатки решены программно задачи расчета энергосиловых параметров обеспечивающих требуемые показатели качества готовой полосы.

Список литературы

1. Шепель А.А. Совершенствование технологий и оборудования процесса прокатки на широкополосных станах первого поколения / Технологический аудит и резервы производства №5 1(19), 2014 С. 45-51
2. Жучков С. М. Оптимизация расхода энергии при непрерывной сортовой прокатке: монография / С. М. Жучков, А. П. Лохматов, Л. В. Кулаков. - К.: Наук.думка, 2008. - 191 с.
3. Снижение энергозатрат при прокатке полос /А.Л. Остапенко, Ю.В. Коновалов, А.Е.Руднев, В.В. Кисель. – К.: Техніка, 1983. – 223 с.
4. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации / А.Хензель, Т.Шпиттель, М.Шпиттель и др. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с.
5. Коновалов, Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос [текст] / Ю.В. Коновалов. – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.
6. Грудев, А.П. Технология прокатного производства [текст]: Учебник. / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханнин. – М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
7. Сталь на рубеже столетий [Текст]: учебн. пособие / Л.Н. Белянчиков, Д.И. Бородин, В.С. Валавин и др. ; под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М.: МИСис, 2001. – 664 с.
8. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства [текст]: учебн. пособие / А. И. Рудской , В. А. Лунев. – СПб. : Наука, 2008. – 525 с.
9. Полухин П.И. Прокатное производство [текст]: Учебник / П.И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королёв, Ю.М. Матвеев. – М.: Металлургия, 1982. – 696 с.
10. Диомидов, Б.Б. Технология прокатного производства [текст]: учебн. пособие / Б.Б. Диомидов, Н.В. Литовченко – М.: Металлургия, 1979. – 488 с.
11. Василев Я.Д., Мінаєв О.А. Теорія повздовжньої прокатки. – Підручник. – Донецьк: УНІТЕХ 2009. – 488 с.
12. Третьяков А.В. Температурный режим работы валков прокатных станов. М.: Металлургия, 1964-285 с.
13. Зюзин В. И., Бровман М. Я., Мельников А. Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. - М.: Металлургия, 1964. - 270 с.
14. Солод В. С. Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металл и литье Украины. 2006. № 7–8. С. 52–56.
15. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета // Черная металлургия. Бюлл. ин-та «Черметинформация», 2009. - №3. - С. 54-79.
16. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство [текст]: учебн. / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. – К. : Вища школа, 1988. – 352 с.
17. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. М.: Металлургиздат, 1962. – 494 с.

Рукопис подано до редакції 26.03.15