

Б.Н.Колосов, А.А.Горбанев, П.В.Токмаков, П.А.Киселев

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ НА РЕВЕРСИВНОМ ОБЖИМНО–ЗАГОТОВОЧНОМ СТАНЕ

Целью данной работы являлись выбор и обоснование методики расчета энергосиловых параметров прокатки на реверсивном обжимно–заготовочном стане. В основу методики расчета энергосиловых параметров прокатки на стане 850 положены основные аналитические, эмпирические и полуэмпирические выражения, адекватно описывающие условия прокатки на обжимных реверсивных станах. Выполнен расчет энергосиловых параметров реверсивной прокатки заготовки круглого сечения диаметром 80 мм из стали марки ШХ15

реверсивный обжимно–заготовочный стан, энергосиловые параметры прокатки, методики расчета

Цель работы и постановка задачи. В мировой практике развития металлургии наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли стали, разливаемой на машинах непрерывной разливки и приближения размеров получаемой непрерывнолитой заготовки к размерам готового проката. В то же время, значительная часть стали разливается в слитки или в непрерывно–литую заготовку большого сечения и проходит дальнейшую обработку на обжимно–заготовочных станах. В этой связи задача совершенствования методики расчета энергосиловых параметров на обжимно–заготовочных станах не снимается с повестки дня, а ее актуальность усиливается в связи с расширением марочного сортамента готовой металлопродукции и необходимостью повышения качества готового проката.

Для разработки технологических решений, обеспечивающих расширение марочного и размерного сортамента и повышения качества продукции, производимой на обжимно–заготовочных станах, наиболее эффективный подход к проектированию режимов обжатий и их совершенствованию состоит в математическом моделировании процесса прокатки с использованием компьютерных программ, адекватно описывающих физические условия реализации процесса прокатки.

Таким образом, моделирование процесса прокатки позволяет оценить нагрузку основного технологического оборудования обжимно–заготовочного стана, существенно упростить и снизить затраты материальных и людских ресурсов, сократить время на освоение технологии производства проката, расширить марочный и размерный сортамент за счет предварительного анализа соответствия прочностных характеристик основных узлов стана действительным усилиям прокатки

Анализ последних достижений и публикаций. Формулы для определения значений давления прокатки, полученные на основании совместного решения дифференциального уравнения равновесия продольных сил

прокатки и уравнения пластичности (методики Кармана, Экелунда, Орована и др.), не отражают особенностей процесса прокатки толстых полос ($l/h_{cp} = 0,1 \dots 1$). При $l/h_{cp} < 1$ на средние показатели давления прокатки оказывают влияние внешние зоны. А при $l/h_{cp} > 1$ – на них оказывают влияние силы трения на контактных поверхностях металла с вальками.

Для определения значения давления прокатки А.И. Целиков [1] предложил учитывать влияние внешних зон эмпирической зависимостью:

$$n_{\sigma}'' = \left(l / h_{cp} \right)^{-0,4} \text{ при } l/h_{cp} < 1, \quad (1)$$

Е.С.Рокотян предложил использовать следующую формулу для расчета среднего значения давления прокатки:

$$p_{cp} = \beta \sigma_1 n_{\sigma}'' n_{\sigma}''', \quad (2)$$

в которой коэффициент, учитывающий влияние внешнего трения, предлагается определять по формуле А.И. Целикова.

Известен ряд работ, авторы которых, используя различные методы, получили формулы для определения значения давления прокатки с учетом особенностей прокатки на обжимных станах (методика Кармана с учетом влияния глубины проникновения пластической деформации; формула В.П.Котельникова, полученная с помощью вариационных методов; формула В.А.Мастерова; формула В.М.Луговского, полученная методом линий скольжения; формула В.М.Клименко; методика М.Я.Бровмана и др.). Анализ методов определения значения давления прокатки на обжимных станах выполнен в работе [2]. Большинство авторов для расчета значений давления прокатки получены формулы, учитывающие соотношение l/h_{cp} , характеризующее влияние внешних зон на коэффициент напряженного состояния металла, $n_{\sigma}'' = \frac{p_{cp}}{\sigma_s}$. Как показали исследования раз-

личных авторов, при $\frac{l}{h_{cp}} \leq 1,0$ уменьшение этого соотношения приводит к

увеличению коэффициента напряженного состояния, который имеет минимальное значение при величине $\frac{l}{h_{cp}}$, близкой к 1. Увеличение соотно-

шения $\frac{l}{h_{cp}}$ при $\frac{l}{h_{cp}} > 1,0$ приводит к увеличению коэффициента напряжен-

ного состояния $\left(\frac{p_{cp}}{\sigma_s} \right)$ вследствие возрастающего влияния сил трения на

поверхности контакта металла с вальками (рисунок).

Изложение основных материалов исследования. В основу методики расчета энергосиловых параметров прокатки на стане 850 [3] положены основные аналитические, эмпирические и полумпирические выраже-

ния, адекватно описывающие условия прокатки на обжимных реверсивных станах.

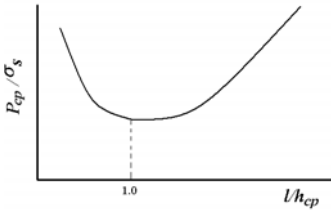


Рисунок. Зависимость, характеризующая изменение коэффициента напряженного состояния от соотношения $\frac{l}{h_{cp}}$ при прокатке

Напряжение текучести при прокатке в каждом проходе стана определяют методом термомеханических коэффициентов,

для заданных степеней деформации ($\varepsilon = \frac{H-h}{H}$), скорости деформации ($u_{cp} = \frac{v \cdot \varepsilon}{\ell} \cdot A_u$) и температуры металла T , $^{\circ}\text{C}$, где H и h – высота

раската до и после прокатки; v – скорость прокатки, изменяется в пределах 2,3...4,5 м/с (установившийся процесс прокатки) и 0,8...1,3 м/с (при захвате); A_u – коэффициент, учитывающий форму очага деформации для данной скорости деформации; ℓ – длина очага деформации $\ell = \sqrt{R_k(H-h)}$, где R_k – катающий радиус.

Для определения средней скорости деформации u_{cp} используют среднее арифметическое значение скорости прокатки при захвате и установившемся процессе. При прокатке в последних проходах $u_{уст}$ выше. Температуру прокатываемого металла и характер ее изменения по проходам определяют расчетом, как среднеинтегральную, или по экспериментальным данным.

По полученным значениям ε , u_{cp} и T определяют термомеханические коэффициенты k_ε , k_u и k_T , а по марке стали определяют базисное напряжение текучести. Окончательное значение напряжения текучести металла рассчитывают по формуле:

$$\sigma_s = \sigma_b \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (3)$$

Дальнейший расчет выполняют с учетом параметров очага деформации в каждом проходе, определяемых соотношениями:

$$m = \frac{\ell}{h_{cp}} = \frac{2\ell}{H+h}, \quad (4) \quad n = \frac{b_{cp}}{h_{cp}} = \frac{B+b}{H+h}, \quad (5)$$

где B и b – ширина раската до и после прохода.

Степень и скорость деформации определяются по формулам:

$$\varepsilon_{cp} = A_\varepsilon \frac{H-h}{H}, \quad (6) \quad u_{cp} = A_u \frac{v(H-h)}{H \cdot \ell}, \quad (7)$$

где H и h – наибольшие высоты профиля до и после прокатки;

A_ε – коэффициент, учитывающий форму очага деформации для данной степени деформации. При прокатке на гладкой бочке, а также для

ромбических и квадратных калибров применяется $A_\varepsilon = 1,0$, а для овальных и круглых калибров соответственно $A_\varepsilon = 0,6$ [4].

В общем случае коэффициент формы очага деформации A_ε равен:

$$A_\varepsilon = \frac{4H}{3F(H-h)} \int_0^{b/2} \ell(x) \frac{\Delta h(x)}{H_{o(x)}} dx, \quad (8)$$

где b – наибольшая ширина полосы; x – координата по ширине калибра; F – горизонтальная проекция контактной поверхности металла с валками.

Коэффициент A_u , входящий в формулу для расчета средней скорости деформации (7), имеет значения $A_u = 1,0$ – при прокатке на гладкой бочке; $A_u = 1,5$ – для ромбических и квадратных калибров; $A_u = 1,33$ – для овальных и круглых калибров [4].

В общем случае коэффициент A_u равен:

$$A_u = \frac{2H\ell}{F\Delta h} \int_0^{b/2} \frac{\Delta h(x)}{H(x)} dx, \quad (9)$$

Коэффициент напряженного состояния металла n_σ при деформации в калибрах, установленный численными расчетами полей линий скольжения [5], при $m > 2$ можно определить как

$$n_\sigma = 0,75 + 0,25 m, \quad (10)$$

а при $2 \geq m \geq 0,5$ – по формуле:

$$n_\sigma = a \left(m + \frac{b}{m} \right), \quad (11)$$

где a и b – постоянные коэффициенты, $a = 0,5$ и $b = 1,0$ – при прокатке на гладкой бочке; $a = 0,75$ и $b = 0,5$ – для ромбических и квадратных калибров; $a = 0,6$ и $b = 0,8$ – для овальных, круглых и шестигранных калибров соответственно.

Коэффициент m , характеризующий параметры очага деформации, изменяется в диапазоне: при горячей прокатке – $7,0 \geq m \geq 0,5$; при прокатке на блюмингах $0,7 \geq m \geq 0,2$; на заготовочных станах $1,0 \geq m \geq 0,5$; при прокатке толстых листов $3,0 \geq m \geq 0,6$ и тонких листов $7,0 \geq m \geq 2,0$.

Окончательно формула для определения значений силы прокатки на обжимных реверсивных станах имеет вид:

$$P = \sigma_S \cdot n_\sigma \cdot n_b \cdot F, \quad (12)$$

где n_b – коэффициент влияния ширины полосы на силу прокатки, определяемый в зависимости от параметров $m = \frac{\ell}{h_{cp}}$ и $n = \frac{b_{cp}}{h_{cp}}$. Коэффициент n_b

определяет влияние главного среднего напряжения и имеет максимальное значение, равное 1,15, при прокатке широких тонких полос, когда можно процесс прокатки рассматривать как плоскую задачу [6]. При прокатке на обжимных станах следует принимать $n_b = 1,0$.

Контактную поверхность при прокатке в калибрах рассчитывают по формуле В.Г.Дрозда [7]:

$$F = cb_1 \sqrt{R_b(H-h)}, \quad (13)$$

где R_b – радиус валка при вершине; b_1 – конечная ширина полосы; c – коэффициент, равный $c = \frac{2}{3}$ – для ромбических калибров;

$c = 0,54$ – при прокатке квадратного сечения в овальном калибре;

$c = 0,75$ – при прокатке овала в квадратном калибре.

При прокатке прямоугольных сечений в ящичных прямоугольных калибрах на стане 850 контактную поверхность можно рассчитывать как $F = b_{cp} \ell$. Для овала, прокатываемого из квадрата, В.Г.Дрозд [8] рекомендует использовать формулу $F = 0,54(b_o + b_1) \sqrt{R_b \Delta h}$. Для различных калибровок В.И.Зюзиным и А.М.Кривенцовым получена следующая формула для расчета контактной поверхности [1]:

$$F = K_k (b_o + b_1) \sqrt{R_e(H-h)}, \quad (14)$$

где R_b – радиус валка по дну калибра; K_k – коэффициент влияния системы калибровки, равный для систем калибров:

квадрат–ромб	– 0,340–0,32;
овал–ребровой овал	– 0,34;
ромб–ромб	– 0,38;
овал–круг, круг–овал	– 0,39–0,42;
квадрат, овал–квадрат	– 0,40–0,41.

Значения момента прокатки для двух валков рассчитывают как:

$$M_{np} = 2P\ell\psi, \quad (15)$$

где ℓ – наибольшее значение длины дуги контакта; ψ – коэффициент положения равнодействующей силы прокатки. М.Я.Бровман [9] рекомендует принимать $\psi = 0,5$ для ящичных калибров при $m < 2$ и $\psi = 0,45$ при $m > 2,0$.

Мощность, затрачиваемая на деформацию металла в калибрах, равна [8]:

$$N_d = p_{cp} Q_1 \cdot V_1 \ln \mu, \quad (16)$$

Таблица 1 – Результаты расчета энергосиловых параметров прокатки на стане 850 круга диаметром 80 мм из заготовки сечением 250 x 300 мм стали ШХ15

Форма калибра	Глубина вреза, мм	Вогнутость дна, мм	Проход	Размеры металла			Абс. обжатие Δh , мм	Уширение Δw , мм	Коэффициент вытяжки, μ	Катающий диаметр при $D = 850$ мм	Длина очага деформации ζ , мм	Параметр $m = \frac{\ell}{h_{cp}}$	Параметр $n = \frac{b_{cp}}{h_{cp}}$	Контактная площадь F , мм ²	Напряжение течения σ_s , Н/мм ²	Коэффициент напращенного состояния n_g	Полное усилие прокатки P , кН	Момент прокатки на два валька $M_{пр}$, кНм	
				H, мм	B, мм	F, мм ²													
Ящичный	60	4	0	250	300	74250													
			1	239	260	62600	61	10	1,186	738	150,03	0,56	0,95	38258	81,4	0,95	3395	509,2	
			2	182	275	50050	57	15	1,251	738	145,03	0,69	1,27	38796	80,15	1,27	3299	478,5	
Ящичный	60	3	3	214	195	41300	61	13	1,212	736	149,83	0,61	0,77	28243	75,05	0,77	2268	339,8	
			4	154	210	31600	60	15	1,307	736	148,59	0,81	1,1	30089	88,22	1,1	2840	422,04	
Ящичный	52	2	5	155	170	25700	55	16	1,230	750	143,61	0,79	0,89	23265	75,05	0,89	1868	268,4	
			6	115	170	18900	55	15	1,36	750	143,61	1,01	1,14	23337	89,19	1,14	2352	337,8	
Квадратный	55		7	133	126	15300	37	11	1,235	740	117	0,77	0,8	14098	81,23	0,8	1214	142,03	
Полуовал	41,5		8	93	155	10600	33	22	1,443	786	113,88	1,04	1,32	16399	86,45	1,32	1502	171,13	
Ромб	54,25		9	118,5	118,5	8300	36,5	25,5	1,277	778	119,16	0,87	0,77	12601	79,98	0,77	1089	129,7	
Овал	28,8		10	67,6	110	6200	50,9	18	1,339	802	142,87	1,54	1,23	16323	82,77	1,23	1675	239,4	
Круг	36,25		11	80,5	80,5	5087	29,5	12,9	1,219	786	107,67	1,13	0,78	7973	74,51	0,78	655	70,6	

где Q_1 – площадь поперечного сечения раската после прохода, V_1 – объем, μ – коэффициент вытяжки

С использованием приведенной выше методики выполнен расчет энергосиловых параметров прокатки заготовки круглого сечения $\varnothing 80$ мм из стали марки ШХ15 на реверсивном обжимно–заготовочном стане 850 РУП «БМЗ» (табл.1).

Анализ результатов показал, что наибольшие значения силы (3395 кН) и момента прокатки (509,2 кНм) наблюдаются в первых проходах, а в целом не превышают допустимых и предусмотренных технологией прокатки.

Заключение. Рассмотрены известные методики расчета энергосиловых параметров прокатки на реверсивном обжимно–заготовочном стане. Показано, что для определения значений энергосиловых параметров реверсивной прокатки на обжимно–заготовочном стане целесообразно использовать методики М.Я. Бровмана, А.И. Целикова с дополнениями Е.С.Рокотяна и В.П. Котельникова. Выполнен расчет энергосиловых параметров реверсивной прокатки заготовки круглого сечения $\varnothing 80$ мм из стали марки ШХ15. Установлено, что значения силы и момента прокатки не превышают допустимых показателей по действующей технологии производства горячекатаного круглого проката в условиях данного предприятия. Указанная методика реализована в виде компьютерной программы, позволяет оценить технологические возможности стана при освоении новых марок стали и профилей проката и упростить проектирование технологии их производства.

1. *Теория прокатки.* Справочник / А.И.Целиков, А.Д.Томленов, В.И.Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – С.334.
2. *Токарев В.А., Павлов В.Л.* Анализ новых методов определения усилия при прокатке на блюминге //Сб. «Прокатное производство». Сб.научн.тр. ИЧМ – Т.ХХI. – М.: Металлургия, 1965. – С. 260-286.
3. *Жучков С.М., Маточкин В.А.* Разработка технологии многоручьевого прокатки–разделения на стане 850 // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ НАН Украины. – № 17. – 2008. – С.172–173.
4. *Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф.* Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. – М.: Металлургия, 1964. – С.270.
5. Механические свойства стали при горячей обработке давлением./ И.Я.Тарновский, А.А.Поздеев, Л.В.Меандров и др. – Свердловск.: Металлургиздат, 1960. – С.264.
6. *Целиков А.И.* Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Металлургиздат, 1962. – С.494.
7. *Победин И.С., Дрозд В.Г.* // «Труды ВНИИметмаш». – №2. - М., ВНИИметмаш, 1960. – С.179-192.
8. *Целиков А.И.* Основы теории прокатки. – М.: Металлургия, 1965. – 248 с.
9. *Бровман М.Я.* Энергосиловые параметры непрерывных заготовочных станов. – М.:Металлургиздат, 1962. – С.218.

*Статья рекомендована к печати:
Ответственный редактор
раздела «Прокатное производство»
канд.техн.наук И.Ю.Приходько
рецензент канд.техн.наук Л.Г.Тубольцев*

Б.Н.Колосов, А.О.Горбаньов, П.В.Токмаков, П.А.Кисельов

Вибір і обґрунтування методики розрахунку енергосилових параметрів плющення на реверсивному обтисково–заготівельному стані

Метою даної роботи є вибір і обґрунтування методики розрахунку енергосилових параметрів плющення на реверсивному обтисково–заготівельному стані. В основу методики розрахунку енергосилових параметрів плющення на стані 850 введено основні аналітичні, емпіричні та напівемпіричні вирази, що адекватно описують умови плющення на обтискових реверсивних станах. Виконано розрахунок енергосилових параметрів реверсивного плющення заготовки круглого перетину діаметром 80 мм із сталі марки ШХ15