

УДК 621.771.016

Однократная прокатка электротехнической анизотропной стали

Мазур Игорь Петрович

mazur@stu.lipetsk.ru

SPIN-код: 6344-1295

Черный Валерий Александрович

chernyj_va@stu.lipetsk.ru

SPIN-код: 6149-2050

Мелихова Элеонора Николаевна^(*)

eleonoramelihova56@gmail.com

ЛГТУ, Липецк, Россия

Аннотация. Холодная прокатка трансформаторной стали с особо низкими удельными магнитными потерями на ПАО «НЛМК» ведется на одноклетевом реверсивном стане 1400, который может работать в четырехвалковом и шестивалковом вариантах. Для оценки условий прокатки сверхтонкой трансформаторной стали на стане в разных вариантах были проведены расчеты силовых параметров процесса прокатки по методике А.И. Целикова.

Ключевые слова: электротехническая анизотропная сталь, одноклетевой прокатный стан, режимы прокатки, энергосиловые параметры

Single - stage rolls of electrical anisotropic steel

Mazur Igor Petrovich

mazur@stu.lipetsk.ru

SPIN-code: 6344-1295

Cherny Valery Aleksandrovich

va@stu.lipetsk.ru

SPIN-code: 6149-2050

Melikhova Eleonora Nikolaevna

eleonoramelihova56@gmail.com

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. The rolling of thin strips of transformer steel at NLMK is carried out on a single-cell reversing mill 1400, which can operate in four-roll and six-roll versions. To evaluate the rolling conditions of the transformer strip to a final thickness of 0.22 mm on the mill, calculations of the power parameters of the process were carried out in different variants according to the method of A.I. Tselikov.

Keywords: electrotechnical anisotropic steel, rolling modes, energy-strength parameters

При производстве электротехнической анизотропной (ЭАС, трансформаторной) стали важнейшей характеристикой является удельные магнитные потери. Удорожание электрической энергии и постоянное увеличения объема ее производства являются причиной постоянной работы исследователей и производителей по совершенствованию технологии производства ЭАС. Эти работы направлены как на оптимизацию химического состава стали и режимов ее обработки, так и использование новых процессов получения горячекатаного подката на литейно-прокатных комплексах. Снижение удельных маг-

нитных потерь в ЭАС достигается высоким содержанием в ней кремния и уменьшением толщины полосы. При производстве ЭАС с двукратной холодной прокаткой толщина горячекатаного подката составляет 2,5 мм, первая холодная прокатка на четырехклетьевом стане 1400 производится на толщины 0,6 и 0,7 мм, и вторая холодная прокатка на конечные толщины 0,50, 0,30, 0,27 и 0,23 мм на одноклетьевом стане 1200.

В настоящее время однократная прокатка высокопроницаемой трансформаторной стали (ВПС) с особо низкими удельными магнитными потерями на ПАО «НЛМК» производится на одноклетьевом реверсивном стане 1400 в четырехвалковом варианте с диаметром рабочих валков 290 мм. Стан рассчитан на работу с максимальными значениями: усилия прокатки 20 МН, скорости прокатки 1000 м/мин, мощности главного привода 2×3200 кВт [1–3]. При прокатке полосы толщиной 0,22 мм процесс идет неустойчиво, поэтому в работе рассматриваются режимы прокатки трансформаторной стали при работе стана как в четырехвалковом, так и шестивалковом вариантах.

Для оценки адекватности выбранной методики были проведены расчеты процесса прокатки полосы 2,3–0,26×1050 мм из трансформаторной стали на данном стане в четырехвалковом варианте, по которому имелись данные по режимам прокатки и энергосиловым параметрам. Предел текучести для трансформаторной стали конвертерного производства рассчитывался по формуле [4]:

$$\sigma_T = 442 + 84,5 \varepsilon_{\Sigma}^{0,436}, \text{ Н/мм}^2.$$

Сопоставление фактических и расчетных усилий прокатки (табл. 1) показало достаточно высокую сходимость результатов. Максимальное значение среднего давления металла на валки имеет место в последнем проходе и составляет 1631 Н/мм².

Для оценки силовых условий прокатки полосы трансформаторной стали на толщину 0,22 мм на стане 1400 в четырехвалковом варианте проведены расчеты силовых параметров процесса в пять и в шесть проходов. Режимы прокатки выбирали для разного количества проходов с режимами удельного натяжения (σ_0, σ_1), применяемых в настоящее время при прокатке ЭАС на данном стане. Данные расчетов показывают значения среднего давления металла на валки в последних проходах стана 1760, 1734 Н/мм².

Нужно учитывать, что максимальные значения давления металла на валки при прокатке тонких полос в 1,3–1,6 раза превышают величину среднего давления в зависимости от параметра очага деформации $\frac{L_d}{H_{cp}}$. Предельные значения давления металла на валки для нормальных условий эксплуатации рабочих валков не должны превышать 2100 Н/мм². Увеличение количества проходов не приводит к значительному уменьшению среднего давления металла на валки в последних проходах, но существенно снижает производительность стана и увеличивает износ валков.

Таблица 1

**Параметры прокатки полосы 2,3-0,26x1050 мм на одноклетьевом стане 1400
в четырехвалковом варианте ($D_p = 290$ мм)**

№ прохода	h, мм	ε , %	V, м/с	σ_0 , Н/мм ²	σ_1 , Н/мм ²	μ	σ_{02} , Н/мм ²	$P_{срел}$, Н/мм ²	$P_{расчета}$, МН	$P_{фактич}$, МН	Расхождение, %
1	1,48	35,65	3,5	41	133	0,044	843	707	8,9	10,3	13,6
2	0,94	36,49	4,0	97	205	0,044	942	992	10,9	11,4	4,38
3	0,60	36,17	4,6	113	192	0,043	994	1194	11,4	12,0	5,00
4	0,39	35,00	4,7	121	186	0,042	1022	1397	11,7	12,4	5,64
5	0,26	32,05	5,0	114	229	0,041	1039	1631	12,4	13,2	6,06

Работа стана в шестивалковом варианте предусматривает установку рабочих валков диаметром 150 мм и приводных промежуточных валков диаметром 290 мм с длиной бочки 1600 мм для обеспечения их осевой сдвижки.

Для условий работы стана в шестивалковом варианте приводными являются промежуточные валки. Потери на трение в подшипниках опорных валков ($M_{тр1}$) определялись аналогично четырехвалковому варианту [5]:

$$M_{тр1} = P \mu_0 D_{оп} \frac{D_{пр}}{D_0},$$

где P — усилие прокатки; μ_0 — коэффициент трения подшипников опорных валков; $D_{оп}$ — диаметр ПЖТ (945 мм); $D_{пр}$ и D_0 — диаметры промежуточного и опорного валков.

Потери на трение с учетом трения качения между валками ($M_{трк}$) рассчитывались по методике работы [6]:

$$M_{трк} = M_{р-пр}^{тр.к} + M_{пр-о}^{тр.к};$$

$$M_{р-пр}^{тр.к} = 2 P \cdot C_{в(р-пр)}, \quad M_{пр-о}^{тр.к} = 2 P C_{в(пр-о)},$$

где C — коэффициент плеча силы трения качения; $M_{р-пр}^{тр.к}$, $M_{пр-о}^{тр.к}$ — потери на трение качения между рабочими и промежуточными валками и между промежуточными и опорными валками;

$V_{(р-пр)}$, $V_{(пр-о)}$ — половина площадки контакта в результате упругой деформации рабочего-промежуточного и промежуточного-опорного валков, определяемых по выражениям:

$$V_{(р-пр)} = 1,07 \sqrt{\frac{P}{L_p} \frac{E_p + E_{пр}}{E_p \cdot E_{пр}} \frac{R_p \cdot R_{пр}}{R_p + R_{пр}}};$$

$$V_{(пр-о)} = 1,07 \sqrt{\frac{P}{L_o} \frac{E_{пр} + E_o}{E_{пр} \cdot E_o} \frac{R_{пр} \cdot R_o}{R_{пр} + R_o}},$$

где $E_p, E_{пр}, E_o$ — модули упругости материала рабочего, промежуточного и опорного валков; $R_p, R_{пр}, R_o$ — радиусы рабочего, промежуточного и опорного валков; L_p — длина бочки рабочего валка; L_{oa} — длина активной образующей бочки опорного валка с учетом длины скосов ($l_{ск} = 160$ мм):

$$L_{oa} = L_o - 2l_{ск}.$$

Момент трения в передачах, приведенный к валу двигателя ($M_{тр2}$):

$$M_{тр2} = \frac{M_{п} \frac{D_{пр}}{D_p} + M_{тр1} + M_{трк}}{u} \left(\frac{1}{\eta_{ш}\eta_p\eta_m} - 1 \right),$$

где $M_{п}$ — момент прокатки; $\eta_{ш}, \eta_p, \eta_m$ — КПД элементов главной линии клетки: шпинделей, редуктора и муфты соответственно; u — передаточное отношение редуктора (1,042).

Суммарный момент трения, приведенный к валу двигателя $M_{тр\Sigma}$:

$$M_{тр\Sigma} = \frac{M_{тр1} + M_{трк}}{u} + M_{тр2}.$$

Момент на валу двигателя, необходимый для прокатки ($M_{дв}$):

$$M_{дв} = \frac{M_{п} \cdot D_{пр}}{u \cdot D_p} + M_{тр\Sigma} + M_{хх};$$

$$M_{хх} = 0,04M_{ном} = 0,04 \frac{30N_{ном}}{\pi n_{ном}},$$

где $M_{хх}$ — момент холостого хода; $M_{ном}$ — номинальный момент двигателя; $N_{ном}$ — номинальная мощность двигателя; $n_{ном}$ — номинальная скорость вращения двигателя (600 об/мин).

Мощность двигателя, необходимая для прокатки ($N_{п}$):

$$N_{п} = \frac{M_{дв} v_B u}{R_{пр}}.$$

При разработке режимов прокатки трансформаторной стали на стане в шестивалковом варианте использовали режимы натяжений, применяемые на производстве (табл. 2).

Таблица 2

Параметры прокатки полосы 2,3-0,22×1050 мм на стане 1400 ($D_p = 150$ мм)

№ прохода	h, мм	ε , %	V, м/с	$\sigma_{уд}$ Н/мм ²		μ	σ_{02} , Н/мм ²	$P_{сред}$, Н/мм ²	P, МН	$M_{дв}$, кНм	$N_{дв}$, МВт
				Вход	Выход						
	2,30						442				
1	1,51	34,35	3,5	41	133	0,041	837	655	5,7	43	2,2

Окончание табл. 2

№ прохода	h, мм	ε, %	V, м/с	σ _{уд} , Н/мм ²		μ	σ ₀₂ , Н/мм ²	Р _{сред} , Н/мм ²	Р, МН	М _{дв} , кНм	N _{дв} , МВт
				Вход	Выход						
2	0,90	40,40	4,0	97	205	0,042	949	893	7,0	50	3,0
3	0,55	38,89	4,6	113	192	0,040	1001	1069	6,8	41	2,8
4	0,34	38,18	4,7	121	186	0,040	1029	1212	6,4	33	2,2
5	0,22	35,29	5,0	114	229	0,039	1044	1355	6,0	23	1,6

Данные расчетов показывают, что среднее давление металла на валки при прокатке на стане 1400 в шестивалковом варианте на валках диаметром 150 мм имеет значительно меньшее значение, чем при прокатке на стане в четырехвалковом варианте. Количество проходов при прокатке на реверсивном стане в шестивалковом варианте будет зависеть от обеспечения температурного режима прокатки, плоскостности полосы, ее обрывности и других факторов.

Список источников

- [1] Пименов В.А., Бабушко Ю.Ю., Бахтин С.В. Разработка технологии реверсивной холодной прокатки тонкого высококремнистого проката на основе математической модели энергосиловых и тепловых процессов. *Сталь*, 2014, № 10, с. 35–39.
- [2] Третьяков В.А., Варшавский Е.А., Мирошников Ю.В. Освоение технологии прокатки тончайшей полосы из высококремнистой стали на реверсивном стане с осевой сдвижкой рабочих валков. *Производство проката*, 2015, № 11, с. 15–20.
- [3] Пименов В.А., Бабушко Ю.Ю., Бахтин С.В. Разработка технологии холодной прокатки на реверсивном стане тончайшего проката высококремнистой стали. *XX Конгресс прокатчиков: сб. матер.* Липецк, Ваш формат, 2015, с. 103–107.
- [4] Долматов А.П., Скороходов В.Н., Настич В.П., Чеглов А.Е. *Автоматизированное проектирование и реализация технологии холодной прокатки электротехнической стали.* Москва, Наука и технология, 2000, 446 с.
- [5] Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. *Расчет параметров листовой прокатки. Справочник.* Москва, Металлургия, 1986, 430 с.
- [6] Третьяков А.В. *Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки.* Москва, Металлургия, 1966, 255 с.