окрасить плотными материалами, то влага, задерживаясь в стенах, вызывает нежелательные явления. В стенах нарушается нормальный воздухопарообмен. Повышенная влажность способствует набуханию кладки, что приводит к ослаблению их структурной связи. Гидравлическое расширение в кладках ниже примерно в 35 раз, чем в штукатурках из цементных и сложных растворов (по И.А. Ковельману, для кирпича оно равно 40, для цементного раствора – 970). Возникают натяжения в плоскости соприкосновения между штукатурками и кладками. Это вторая причина. Третьей причиной, влияющей на разрушение каменных стен под цементными штукатурками, является большая разница в коэффициентах температурных линейных расширений этих материалов (3,9 – для кирпича, 7,6 – для цементного раствора). Скапливание влаги в стенах приводит также к увеличению теплопроводности. Вред состоит также и в том, что кладки у внешних поверхностей стен приобретают повышенную влажность и во время замерзания разрушаются. Существует много примеров, подтверждающих данные выводы.

С другой стороны, известково-песчаные растворы и штукатурки наиболее отвечают условиям сохранения каменных стен (коэффициент паропроницаемости таких штукатурок почти совпадает с воздухо- и паропроницаемостью каменных кладок или даже превышает их) и благоприятно отражаются на режиме стен зданий, которые хорошо сохраняются под известковой штукатуркой более 100 лет. Эти выводы также можно подтвердить многочисленными примерами.

Результаты проведенных обследований показывают, что для реставрации памятников архитектуры желательно использование строительных материалов, подобных тем, из которых было изначально возведено здание. При этом необходимо учитывать состав и размеры кирпича, состав кладочного раствора, историческую технологию их изготовления. По возможности следовало бы установить, где добывали сырье для изготовления материалов во время строительства памятника архитектуры, и попытаться использовать новый реставрационный материал, изготовленный из того же сырья и имеющий свойства, приближенные к свойствам отобранных образцов.

Литература

1. *Порывай, Г.А.* Технология и организация работ по ремонту конструкций зданий / Г.А. Порывай. – М., 1980.

2. Реставрация памятников архитектуры / под ред. С.С. Подъяпольского. – М., 2000.

УДК 621.771.073:539.62

В.В. Ермилов

ПРИНЦИПЫ ПРОКАТКИ В МНОГОВАЛКОВЫХ КЛЕТЯХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ, ИСКЛЮЧАЮЩИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОБУКСОВКИ

В клетях «кварто» и в шестивалковых клетях движение от приводных валков к холостым передается силами трения первого рода, в частности, силой трения покоя. При определенных условиях возможна ситуация, когда холостые валки начнут пробуксовывать относительно приводных. В статье приводятся основные принципы прокатки, исключающие возникновение пробуксовки.

Клеть прокатного стана, трение первого рода, валок, напряжение.

In quarto and six-high rolling stands the movement from driving shafts to idle ones is transferred by first kind friction force, particularly by the static friction force. Under certain circumstances the situation is possible when idle shafts will start slipping relative to drive shafts. The article considers the basic principles of rolling, eliminating slipping during rolling.

Rolling mill stand, friction of the first kind, roller, tension.

В рабочих клетях станов холодной прокатки в контакте между валками действуют трение качения и трение покоя. От значения коэффициента трения покоя зависит работоспособность клетей «кварто» – основных клетей тонколистовых станов, а также многовалковых клетей (шести-, двенадцати- и двадцативалковой), так как с помощью этого вида трения обеспечивается передача вращения от приводных валков к холостым по принципу фрикционной передачи.

Если не обеспечено необходимое значение коэффициента трения покоя, происходит пробуксовка холостых валков. Для рабочих клетей станов холодной прокатки пробуксовка – это аварийная ситуация, вызывающая остановку стана и необходимость смены валков.

Известные теоретические данные не позволяли оценить уровень коэффициента трения покоя и влияние на него энергосиловых факторов прокатки и геометрических характеристик клети.

К числу факторов, затрудняющих исследование трения покоя, относятся специфические условия в межвалковом контакте рабочих клетей (высокие нормальные и касательные контактные напряжения, большие скорости, использование специальных сталей для изготовления валков, высокая твердость их

поверхности, наличие эмульсии в контакте и т.д.).

Условие отсутствия пробуксовки [2, с. 37] характеризуется двумя факторами: тангенсом угла наклона tgβ межвалкового усилия к плоскости, проходящей через оси валков, и коэффициентом трения покоя f_0.

Для исключения опасности возникновения пробуксовки в контакте валков клети «кварто» с любым типом привода и шестивалковой клети всегда должно выполняться условие

$$\mathrm{tg}\beta < f_0, \qquad (1)$$

т.е. значение тангенса угла наклона межвалкового усилия tgβ к плоскости, проходящей через оси валков, не должен превышать значения коэффициента трения покоя f_0.

Коэффициент трения покоя f_0 является эмпирическим параметром условий работы прокатной клети и не может быть определен теоретически для клети стана холодной прокатки из-за случайных факторов, влияющих на его значение. С высокой точностью коэффициент f_0 может быть рассчитан для условий трения в межвалковом контакте по экспериментально полученной регрессионной зависимости [3, с. 79]:

$$f_0 = 2,23\cdot10^{-2} + 3,105\cdot10^{-2}\frac{p_0}{p_{0_{\min}}} +$$

$$+ 5,88\cdot10^{-3}\frac{\omega}{\omega_{\min}} + 1,0794\cdot10^{-2}\frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{х}}} +$$

$$+ 7,1775\cdot10^{-4}\frac{C}{C_{\min}} + 4,05\cdot10^{-3}\frac{p_0}{p_{0_{\min}}}\frac{\omega}{\omega_{\min}} -$$

$$- 4,725\cdot10^{-4}\frac{p_0}{p_{0_{\min}}}\frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{х}}} + 2,025\cdot10^{-3}\frac{p_0}{p_{0_{\min}}}\frac{C}{C_{\min}} +$$

$$+ 8,37\cdot10^{-3}\frac{\omega}{\omega_{\min}}\frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{х}}} - 3,06\cdot10^{-3}\frac{\omega}{\omega_{\min}}\frac{C}{C_{\min}} -$$

$$- 2,4795\cdot10^{-3}\frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{х}}}\frac{C}{C_{\min}}, \qquad (2)$$

где f_0 – коэффициент трения покоя; p_0 – нормальное контактное напряжение, p_0 = 675÷825 МПа; ω – угловая скорость вращения приводного валка, ω = = 30÷50 $с^{-1}$; $D_{\text{пр}}$, $D_{\text{х}}$ – диаметры приводного и холостого валков, мм ($D_{\text{пр}}$ / $D_{\text{х}}$ = 0,36÷7); C – концентрация эмульсола в используемой эмульсии, C = 0,75÷2,25 %.

Экспериментально установленный коэффициент трения покоя соответствует максимальному значению силы трения покоя, возникающей на контакте валков. Момент начала пробуксовки предшествует моменту, когда сила трения покоя в межвалковом контакте достигает своего максимума. Поэтому коэффициент трения покоя f_0 непосредственно не характеризует возникновения пробуксовки: для прогнозирования момента начала пробуксовки в формулу (1) необходимо внести поправочный коэффициент для f_0 – коэффициент запаса k:

$$\mathrm{tg}\beta < k\ f_0. \qquad (3)$$

Для условий контакта стальных валков в клетях «кварто» станов холодной прокатки коэффициент запаса k может быть принят равным 0,90.

Причины пробуксовки в многовалковых клетях различных конструкций отличаются, но ее появление в межвалковом контакте рабочей клети с любым типом привода недопустимо вследствие возникновения опасной ситуации на стане. Соблюдение условия отсутствия пробуксовки является неотъемлемой частью энергосилового расчета многовалковых клетей широкополосных станов холодной прокатки.

Возникновение пробуксовки в клетях «кварто» с традиционным типом привода возможно только во время переходных режимов работы стана, характеризуемых главным образом угловым ускорением при разгоне или торможении. Ускорение является конструктивно заданным параметром клети, поэтому снизить опасность возникновения пробуксовки в межвалковом контакте клетей с традиционным типом провода можно уже на стадии проектирования стана.

При проектировании необходимо учитывать некоторые особенности трения в переходных режимах стана. Как известно, при нагружении межвалкового контакта касательным усилием микронеровности поверхностей валков испытывают пластическую деформацию; при повторном приложении усилия того же направления деформации микронеровностей из-за наклепа становятся упругими. Но если приложить касательное усилие противоположного направления, то деформация микронеровностей снова становится пластической [4, с. 21]. Поэтому в режиме торможения коэффициент трения покоя несколько выше, чем в режиме разгона или при работе с постоянной скоростью [1, с. 76].

Таким образом, учитывая особенности трения первого рода в межвалковом контакте, для гарантирования режима прокатки без пробуксовки в четырех- и шестивалковых клетях, при проведении энергосиловых расчетов необходимо использовать выражение (3).

В клетях с приводом через рабочие валки возникновение пробуксовки возможно только при переходных процессах стана, и оно характеризуется в первую очередь ускорением.

Поэтому методика прокатки в клетях с традиционным типом привода, исключающая опасность возникновения пробуксовки в межвалковом контакте, разработана для переходных режимов работы стана [5]. Например, на станах бесконечной прокатки применение данной методики актуально для режимов прокатки сварных швов (особенно переходных швов), когда скорость прокатки значительно изменяется.

Для предотвращения пробуксовки необходимо провести проверку условия (3) для каждой клети стана, а в случае опасной ситуации – корректировку энергосиловых параметров стана. Коэффициент тре-

ния покоя, входящий в формулу (3), рассчитывается по регрессионной зависимости (2), а тангенс угла наклона межвалкового усилия tgβ определяется по следующей формуле [2, с. 37]:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\frac{\mp M_{\text{ин. оп}}}{P}\cos\gamma + k + \rho_{\text{оп}}}{\frac{\mp M_{\text{ин. оп}}}{P}\sin\gamma + \frac{D_{\text{оп}}}{2}}, \qquad (4)$$

где $M_{\text{ин. оп}}$ – инерционный момент опорного валка; γ – угол между вертикальной осевой плоскостью опорного валка и плоскостью, проходящей через оси валков; k – плечо трения качения между рабочим и опорным валками; $\rho_{\text{оп}}$ – радиус круга трения в подшипниках опорного валка; P – усилие прокатки; $D_{\text{оп}}$ – диаметр бочки опорного валка.

Для проверки условия (3) необходимо знать геометрические и конструкционные характеристики каждой клети стана: диаметры рабочих и опорных валков; длину бочки опорных валков; длину скосов на бочках опорных валков; диаметр цапф подшипников рабочих и опорных валков; горизонтальное смещение оси рабочих валков относительно оси опорных валков в направлении прокатки; коэффициент трения в подшипниках опорных валков; конструктивно заданное угловое ускорение при торможении и при разгоне валков (табл. 1).

Кроме того, должна быть известна концентрация эмульсола в используемой смазочно-охлаждающей жидкости.

Разработанная методика для станов, оснащенных клетями с традиционным типом привода, также предполагает непосредственное измерение в процессе прокатки следующих параметров работы: мощности, затрачиваемой электродвигателями на вращение рабочих валков; усилия прокатки; толщины проката и толщины подката; заднего и переднего натяжений полосы; угловой скорости вращения рабочих валков.

В табл. 2 приведены фактические режимы прокатки на пятиклетевом стане «1700».

Таблица 1

Геометрические и конструкционные характеристики клетей стана «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь»

Параметр	Номер клети				
	1	2	3	4	5
Диаметр рабочего валка, мм	600	600	600	600	600
Диаметр опорного валка, мм	1500	1500	1500	1500	1500
Длина бочки рабочего валка, мм	1700	1700	1700	1700	1700
Длина бочки опорного валка, мм	1600	1600	1600	1600	1600
Длина скосов на бочках опорных валков, мм	150	150	150	150	150
Диаметр цапф подшипников рабочих валков, мм	300	300	300	300	300
Диаметр цапф подшипников опорных валков, мм	1120	1120	1120	1120	1120
Горизонтальное смещение оси рабочих валков относительно оси опорных валков в направлении прокатки, мм	6	6	6	6	6
Коэффициент трения в подшипниках опорных и рабочих валков	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Таблица 2

Характерные фактические режимы прокатки на пятиклетевом стане «1700»

Номер режима	Марка стали, ширина, конечная толщина полосы, мм	Номер клети i	h_{i-1}, мм	h_i, мм	σ_{i-1}, МПа	σ_i, МПа	ω_p, 1/с	P, МН	$N_{\text{дв. ф}}$, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	08ю; b = 1115; h = 1,404	1	3,552	2,829	47	139	20	9,20	2450
		2	2,829	2,257	139	155	24	9,16	4488
		3	2,257	1,824	155	171	32	8,91	4853
		4	1,824	1,533	171	178	37	7,66	3174
		5	1,533	1,404	178	42	40	11,07	5054
2	DC05 (типа 08ю); b = 1025; h = 1,020	1	4,312	2,992	38	142	16	14,20	3761
		2	2,992	2,051	142	154	23	10,26	4671
		3	2,051	1,450	154	173	34	9,14	5235
		4	1,450	1,077	173	183	46	7,60	4425
		5	1,077	1,020	183	43	48	10,97	2977
3	DC04 (типа 08пс); b = 1510; h = 0,769	1	2,868	2,040	37	140	16	15,86	3230
		2	2,040	1,463	140	149	22	13,25	4558
		3	1,463	1,051	149	161	32	12,11	5350
		4	1,051	0,802	161	173	43	11,23	4249
		5	0,802	0,769	173	45	45	12,96	3176

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	08пс; b = 1250; h = 0,520	1	2,024	1,443	63	141	12	10,43	2775
		2	1,443	1,025	141	155	16	9,57	2739
		3	1,025	0,738	155	174	23	9,02	2359
		4	0,738	0,533	174	191	32	9,05	2805
		5	0,533	0,520	191	41	33	5,03	1541

Примечание. h_{i-1}, h_i – толщина полосы на входе в i-ю клеть и на выходе из i-й клети; σ_{i-1}, σ_i – заднее и переднее удельные натяжения полосы в i-й клети; $\omega_р$ – угловая скорость вращения рабочего валка; P – усилие прокатки; $N_{дв.ф}$ – мощность, затрачиваемая на вращение приводных опорных валков.

Методика прогнозирования пробуксовки и корректировки энергосиловых параметров работы стана с клетями «кварто» с приводом через рабочие валки включает в себя следующие этапы:

1. Определение геометрических и конструктивных характеристик рабочих клетей, измерение концентрации используемой эмульсии.

2. Определение энергосиловых параметров работы каждой клети стана, необходимых для расчета тангенса угла наклона межвалкового усилия tgβ и коэффициента трения покоя f_0 (рассмотрены выше). Для расчета tgβ согласно уравнению (4) и коэффициента трения покоя f_0 по формуле (2) необходимо определить для каждой клети стана непосредственно входящие в уравнения энергосиловые и геометрические характеристики (см. пп. 3 – 9).

3. Определение угла наклона плоскости, проходящей через оси валков, к вертикали γ:

$$\gamma = \arcsin \frac{2x_г}{D_{оп} + D_р},$$

где $x_г$ – расстояние между вертикальными осевыми плоскостями рабочего и опорного валков (горизонтальное смещение рабочего валка относительно опорного); $D_р$ – диаметр бочки рабочего валка.

4. Определение плеча усилия прокатки:

$$a = \frac{N_{пр}}{2\,P\,\omega_р},$$

где $N_{пр}$ – мощность прокатки, принимается равной мощности, затрачиваемой на вращение приводных опорных валков; P – усилие прокатки; $\omega_р$ – угловая скорость вращения рабочих валков.

5. Расчет радиуса круга трения в подшипниках опорных валков:

$$\rho_р = f_{п.р}\frac{d_{п.р}}{2};\quad \rho_{оп} = f_{п.оп}\frac{d_{п.оп}}{2},$$

где $f_{п.р}$, $f_{п.оп}$ – коэффициенты трения в подшипниках рабочего, опорного валков, определяемые типом подшипника и свойствами смазки; $d_{п.р}$ и $d_{п.оп}$ – рабочие диаметры подшипников рабочего, опорного валков.

6. Определение полуширины площадки упругого сплющивания валков, согласно теории Герца:

$$b = 1{,}128\sqrt{0{,}5\,\eta\frac{P}{(L_{оп} - 2\,c)}\frac{D_р\,D_{оп}}{D_р + D_{оп}}},$$

где η – приведенный модуль упругости материалов валков; $L_{оп}$ – длина бочки опорных валка; c – длина скосов на бочке опорных валков; $(L_{оп} - 2\,c)$ – параметр, характеризующий длину контакта валков.

7. Определение плеча трения качения в контакте валков k (табл. 3).

Таблица 3

Энергосиловые и геометрические характеристики для режимов прокатки с приводом через рабочие валки на пятиклетевом стане «1700»

Номер режима	Марка стали, ширина, конечная толщина полосы, мм	Номер клети i	γ, град	a, мм	$\rho_{оп}$, мм	k, мм	p_0, МПа	tgβ	f_0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	08ю; b = 1115; h = 1,404	1	0,327	6,7	2,8	4,04	1115	0,013	0,117
		2		10,2		4,04	1110	0,013	0,128
		3		8,51		3,98	1096	0,014	0,143
		4		5,6		3,69	1017	0,014	0,121
		5		5,7		4,44	1221	0,013	0,128
2	DC05 (типа 08ю); b = 1025; h = 1,020	1	0,327	8,3	2,8	5,03	1382	0,013	0,128
		2		9,9		4,27	1177	0,013	0,123
		3		8,4		4,03	1110	0,013	0,131
		4		6,3		3,68	1011	0,014	0,137
		5		2,82		4,42	1215	0,013	0,151

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	DC04 (типа 08пс); b = 1510; h = 0,769	1	0,327	6,4	2,8	5,31	1437	0,013	0,132
		2		7,8		4,85	1338	0,013	0,131
		3		6,9		4,64	1278	0,013	0,138
		4		4,4		4,47	1230	0,013	0,146
		5		2,7		4,80	1322	0,013	0,154
4	08пс; b = 1250; h = 0,520	1	0,327	9,3	2,8	4,31	1185	0,013	0,113
		2		8,8		4,12	1137	0,013	0,120
		3		5,7		4,00	1104	0,014	0,113
		4		4,8		4,01	1105	0,013	0,114
		5		4,6		2,99	824	0,016	0,128

8. Определение нормального напряжения в межвалковом контакте по формуле Беляева – Герца:

$$p_0 = \frac{2P}{\pi b \left(L_{\text{оп}} - 2c\right)},$$

9. Расчет инерционного момента опорного валка $M_{\text{ин. оп}}$:

$$M_{\text{ин. оп}} = m\frac{D^2}{8}\varepsilon = \frac{\pi}{32} L \gamma D^4 \varepsilon,$$

где m – масса; D – наружный диаметр; L – длина бочки; γ – плотность материала; ε – угловое ускорение.

10. Расчет тангенса угла наклона межвалкового усилия tgβ к плоскости, проходящей через оси этих валков, по формуле (4).

Результаты вычислений энергосиловых и геометрических характеристик (см. пп. 3 – 9) для каждого режима прокатки приведены в табл. 3.

11. Определение коэффициента трения покоя в межвалковом контакте клети «кварто» по регрессионной зависимости (2). Результаты вычислений приведены в табл. 3.

12. Проверка выполнения условия отсутствия вероятности возникновения пробуксовки (3).

13. Если условие (3) не выполняется хотя бы для одной клети, то необходимо скорректировать энергосиловые параметры работы стана путем перераспределения обжатий и по клетям (увеличить обжатие в клети, где возникла опасность пробуксовки).

После корректировки режима прокатки необходимо проверить для каждой клети стана соблюдение условия, исключающего возникновение пробуксовки (3), то есть провести повторный расчет с пункта 2 по пункт 12.

Управление режимом прокатки на стане по разработанной методике должно производиться автоматически.

Таким образом, разработан способ прокатки на широкополосном стане, оснащенном клетями «кварто» с приводом через рабочие валки, исключающий опасность возникновения пробуксовки [5].

Литература

1. *Андреев, А.В.* Передача трением / А.В. Андреев. – М., 1978.

2. *Гарбер, Э.А.* Расчет энергосиловых параметров широкополосных станов холодной прокатки / Э.А. Гарбер // Сталь. – 1998. – № 9. – С. 37 – 41.

3. *Ермилов, В.В.* Проблема трения первого рода в межвалковом контакте многовалковых клетей станов холодной прокатки / В.В. Ермилов // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 1 (28). – С. 79 – 81.

4. *Крагельский, И.В.* Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М., 1977.

5. Пат. 2210442 Российская Федерация, С 2, 7 В 21 В 1/28. Способ холодной прокатки полосы на стане с четырехвалковыми клетями с приводом через рабочие валки / Гарбер Э.А., Горшков И.К., Ермилов В.В.; № 2001128270; заявл. 18.10.01; опубл. 20.08.03, Бюл. № 52.

УДК 669.02/09

Н.В. Телин, Н.Н. Синицын

АЛГОРИТМ ПОЭТАПНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННО-СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАЗЛИВКИ

Предложены прямой и обратный алгоритмы поэтапного моделирования температурно-деформационно-скоростного режима разливки стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с выделением трех зон формирования слитка.

Моделирование режима разливки производится на основе последовательного использования математических моделей, сначала отдельно для зоны кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения и зоны обжатия, а затем в целом для всей линии разливки.

При практической реализации метода могут применяться как одномерные, так и многомерные модели.