

**ПОДСЧЕТ МОМЕНТА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ЛЕНТЫ
С НАТЯЖЕНИЕМ**

Момент на валу двигателя, необходимый для привода валков стана при прокатке с натяжением, можно записать следующим образом:

$$M_{i, \text{дв}} = \frac{M_{i, \text{пр}}}{j} + \frac{M_{i, \text{тр}}}{j} + M_{\text{х.х}} + M_{\text{дин}}, \quad (1)$$

где $M_{i, \text{пр}}$ — момент прокатки с натяжением;
 $M_{i, \text{тр}}$ — момент добавочных сил трения, возникающих при прокатке в подшипниках валков и передаточных механизмах стана;
 $M_{\text{х.х}}$ — момент холостого хода стана;
 $M_{\text{дин}}$ — момент, необходимый для преодоления инерционных усилий;
 j — передаточное число передачи между валками и двигателем.

Момент прокатки с натяжением

$$M_{i, \text{пр}} = M_{i, \text{деф}} + M_{i-1} - M_i. \quad (2)$$

Момент, необходимый для преодоления сопротивления деформации металла и контактных сил трения между лентой и валками

$$M_{i, \text{деф}} = \frac{N_{i, \text{деф}}}{\omega_i} = \rho_i b h_i r_i \xi_i \ln \lambda_i. \quad (3)$$

Здесь $N_{i, \text{деф}}$ — мощность, расходуемая на преодоление сопротивления деформации металла и контактных сил трения между лентой и валками;

ρ_i — среднее удельное давление металла на валки при прокатке без натяжения, но с учетом изменившихся условий контактного трения между лентой и валками под влиянием натяжения [1];

ω_i и r_i — угловая скорость и радиус валков;
 h_i — толщина ленты на выходе из валков;
 b — ширина ленты;
 ξ_i — коэффициент опережения;
 λ_i — коэффициент вытяжки металла.

Момент заднего натяжения

$$M_{i-1} = \frac{N_{i-1}}{\omega_i} = \frac{T_{i-1} v_{i-1}}{\omega_i} = t_{i-1} b h_i r_i \xi_i, \quad (4)$$

где N_{i-1} — мощность заднего натяжения;
 v_{i-1} — входная скорость ленты;
 T_{i-1} и t_{i-1} — абсолютное и удельное заднее натяжение.

Момент переднего натяжения

$$M_i = \frac{N_i}{\omega_i} = \frac{T_i v_i}{\omega_i} = t_i b h_i r_i \xi_i, \quad (5)$$

где N_i — мощность переднего натяжения;
 v_i — выходная скорость ленты;
 T_i и t_i — абсолютное и удельное переднее натяжение.

После подстановки уравнений (3), (4) и (5) в уравнение (2) получим формулу А. И. Целикова [1] для расчета момента при прокатке с натяжением

$$M_{i,пр} = b h_i r_i \xi_i \{ p_i \ln \lambda_i - (t_i - t_{i-1}) \}. \quad (6)$$

Для определения значения \bar{p}_i А. И. Целиков [1] рекомендует приближенно:

$$\bar{p}_i \approx \bar{p}_{i,н} + \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad (7)$$

где $\bar{p}_{i,н}$ — удельное давление с учетом влияния натяжения.

На основе анализа экспериментальных [2, 3] и др. нами было принято

$$\bar{p}_i \approx \bar{p}_{i,н} + t_{i-1} + \frac{1}{2} t_i. \quad (8)$$

Момент добавочных сил трения, возникающих при прокатке в подшипниках валков и передаточных механизмах стана

$$M_{i,тр} = M_{i,тр_1} + M_{i,тр_2}. \quad (9)$$

Момент трения в подшипниках валков

$$M_{i,тр_1} = P_i d_{ш} \mu, \quad (10)$$

где P_i — усилие прокатки;
 $d_{ш}$ — диаметр шейки валков;
 μ — коэффициент трения в подшипниках качения, равный 0,003.

Момент трения в передаточных механизмах стана

$$M_{i,тр_2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) (M_{i,пр} + M_{i,тр_1}), \quad (11)$$

где η — к. п. д. передачи от двигателя к валкам.

Для двухступенчатой зубчатой передачи значение $\eta = 0,94$ [1].

Динамический момент $M_{i,дин} = 0$, так как рассматривается установившийся процесс прокатки.

С целью проверки правильности формулы (6) с подстановкой в нее выражения (8) нами были проведены опыты на реверсивном стане с моталками Института металлургии (Свердловск) [4].

В качестве материала для опытов использовали ленту из стали 10сп шириной 95 мм и толщиной 1,94 мм, поверхность которой до прокатки была приведена в состояние, обеспечивающее примерно одинаковые условия внешнего трения. Прокатку производили со скоростью 0,75 м/сек (ниже основной скорости двигателя) с разным сочетанием заднего и переднего натяжений в валках диаметром 257,2 мм при коэффициентах вытяжки 1,44 и 1,60 и в валках диаметром 99,5 мм с коэффициентом вытяжки 1,42.

При проведении опытов фиксировали на ленту осциллографа усилие прокатки, силу якорного тока двигателя стана, усилия переднего и заднего натяжений. Опережение определяли методом меток.

Численные значения величин, входящих в формулу (6), находили по данным осциллограмм по следующим равенствам:

Удельное давление

$$\bar{p}_{i,н} = \frac{P_i}{\sqrt{b r_i (2m P_i + b \Delta h_i)}} \text{ кн/мм}^2,$$

где P_i — усилие прокатки, кн;

Δh_i — абсолютное обжатие, мм;

m — коэффициент, который для стальных валков принимают равным 1,029 мм²/кн.

Удельные натяжения

$$t_{i-1} = \frac{T_{i-1}}{b h_{i-1}} \text{ кн/мм}^2 \text{ и } t_i = \frac{T_i}{b \cdot h_i} \text{ кн/мм}^2,$$

где h_{i-1} — выходная толщина ленты, мм.

Коэффициент опережения

$$\xi_i = \frac{S_{i,1}}{S_i},$$

где S_i и $S_{i,1}$ — расстояния между рисками на валке и на ленте, мм.

Опытное значение момента на валу двигателя определяли по равенству

$$M'_{i,дв} = c I_{i,я}, \quad (12)$$

где коэффициент $c = 2,864 \text{ нм/а}$ в соответствии с паспортом стана и данными экспериментальной проверки;

$I_{i,я}$ — якорный ток двигателя без учета его значения при холостом ходе стана, а.

Таблица 1
Сравнение расчетного и опытного моментов прокатки на валу двигателя, приведенного к валам, при холодной прокатке с натяжением ленты из стали Юсп

Номер опыта	T_{i-1} кН	T_i кН	t_{i-1} кН/мм ²	t_i кН/мм ²	$t_{i-1} - t_i$ кН/мм ²	P_i кН	$\frac{P_i}{K}$ кН/мм ²	$t_i - 1 + \frac{t_i}{2}$ кН/мм ²	$\frac{P_i}{K}$ кН/мм ²	ξ_i	M_i , пр. кН·м	M_i , тр. кН·м	M_i , дв. кН·м	$M_{дв} - M'_{дв}$ кН·м	$\frac{M_{дв} - M'_{дв}}{M'_{дв}}$ %
-------------	-----------------	-------------	---------------------------------	-----------------------------	---------------------------------------	-------------	---------------------------------------	---	---------------------------------------	---------	---------------------	---------------------	---------------------	----------------------------	---

1. $b=95$ мм, $h_0=1,94$ мм, $\lambda=1,44$, $d=257,2$ мм, $f=10$

1	3,30	19,5	0,019	0,150	0,131	558	0,608	0,094	0,702	1,068	2,12	0,38	2,50	2,64	-5,6
2	6,00	16,4	0,032	0,128	0,096	549	0,604	0,096	0,704	1,055	2,68	0,42	3,11	3,14	-0,9
3	10,4	15,6	0,057	0,123	0,067	549	0,604	0,119	0,722	1,043	3,25	0,45	3,70	3,82	-3,0
4	11,8	11,8	0,064	0,092	0,028	539	0,598	0,110	0,708	1,031	3,85	0,49	4,35	4,31	0,7
5	16,4	8,80	0,089	0,070	-0,020	529	0,588	0,124	0,711	1,022	4,66	0,55	5,20	5,00	4,1
6	16,7	5,20	0,091	0,040	-0,051	529	0,588	0,112	0,700	1,017	5,09	0,58	5,65	5,49	3,0
7	20,1	3,90	0,109	0,030	-0,078	519	0,578	0,124	0,702	1,010	5,54	0,60	6,14	6,08	1,0

2. $b=95$ мм, $h_0=1,94$ мм, $\lambda=1,60$, $d=257,2$ мм, $f=0$

1	7,10	17,2	0,038	0,150	0,112	666	0,656	0,113	0,769	1,059	4,02	0,56	4,58	4,51	1,52
2	7,00	15,6	0,038	0,134	0,096	669	0,662	0,105	0,766	1,056	4,18	0,57	4,75	4,61	3,20
3	9,10	15,1	0,050	0,132	0,082	643	0,637	0,116	0,753	1,055	4,32	0,58	4,89	4,90	-0,20
4	9,70	15,6	0,053	0,134	0,081	643	0,637	0,120	0,757	1,054	4,38	0,58	4,96	4,90	1,2
5	11,5	11,5	0,063	0,096	0,033	628	0,628	0,111	0,738	1,043	4,98	0,61	5,58	5,59	-0,2
6	17,5	7,60	0,095	0,066	-0,029	628	0,628	0,127	0,755	1,029	5,92	0,68	6,60	6,56	0,4
7	17,4	5,40	0,094	0,047	-0,047	632	0,632	0,118	0,750	1,025	6,18	0,70	6,86	6,76	1,6

Табл. 1 (продолжение)

Номер опыта	T_{i-1} кН	T_i кН	t_{i-1} кН/мм ²	t_i кН/мм ²	$t_{i-1} - t_i$ кН/мм ²	P_i кН	$\frac{P_i}{K}$ кН/мм ²	$t_i - 1 + \frac{t_i}{2}$ кН/мм ²	$\frac{P_i}{K}$ кН/мм ²	ξ_i	M_i , пр. кН·м	M_i , тр. кН·м	M_i , дв. кН·м	$M_{дв} - M'_{дв}$ кН·м	$\frac{M_{дв} - M'_{дв}}{M'_{дв}}$ %
-------------	-----------------	-------------	---------------------------------	-----------------------------	---------------------------------------	-------------	---------------------------------------	---	---------------------------------------	---------	---------------------	---------------------	---------------------	----------------------------	---

3. $b=95$ мм, $h_0=0,92$ мм, $\lambda=1,42$, $d=99,5$ мм, $f=3,95$

1	8,10	15,7	0,095	0,255	0,160	198	0,510	0,222	0,733	1,070	0,32	0,04	0,36	0,41	-11,4
2	10,2	12,9	0,117	0,211	0,094	185	0,500	0,220	0,719	1,042	0,51	0,05	0,56	0,57	-1,0
3	11,3	13,4	0,128	0,220	0,087	182	0,490	0,236	0,726	1,038	0,54	0,05	0,59	0,61	-2,2
4	14,1	15,1	0,162	0,245	0,083	162	0,432	0,276	0,716	1,032	0,54	0,05	0,59	0,62	-4,1
5	15,8	15,7	0,186	0,255	0,069	162	0,432	0,306	0,745	1,023	0,61	0,06	0,66	0,66	1,2
6	7,60	9,30	0,085	0,151	0,066	206	0,539	0,154	0,700	1,031	0,57	0,06	0,63	0,64	-1,5
7	13,9	12,3	0,159	0,199	0,040	176	0,471	0,259	0,729	1,013	0,68	0,06	0,75	0,75	-1,8
8	7,60	5,70	0,086	0,092	0,006	204	0,539	0,132	0,670	1,012	0,72	0,07	0,78	0,78	0,1
9	14,7	9,80	0,168	0,161	-0,007	178	0,480	0,248	0,728	1,006	0,81	0,07	0,89	0,85	4,0
10	14,1	9,10	0,162	0,149	-0,013	181	0,490	0,232	0,726	1,007	0,82	0,07	0,90	0,87	2,9
11	13,9	8,30	0,159	0,134	-0,024	173	0,461	0,226	0,686	1,005	0,82	0,07	0,90	0,86	4,0
12	14,3	6,20	0,164	0,090	-0,074	184	0,490	0,209	0,699	1,000	0,98	0,09	1,07	0,97	9,8

Сравнение расчетного и опытного моментов холодной прокатки стальной ленты (1,28% С) с натяжением (опыты Г. Валквиста и Б. Берга [3])

Номер опыта	T_0 кН	T_1 кН	t_0 кН/мм ²	t_1 кН/мм ²	$t_1 - t_0$ кН/мм ²	P кН	\bar{P}_H кН/мм ²	$t_0 + \frac{t_1}{2}$ кН/мм ²	\bar{P} кН/мм ²	ξ	$M_{пр}$ кН·м	$M'_{пр}$ кН·м	$\frac{M_{пр} - M'_{пр}}{M'_{пр}}$ %
1. $b = 40$ мм, $h_0 = 1,02$ мм, $\lambda = 1,43$, $d = 85$ мм													
1	2,0	2,00	0,048	0,069	0,021	184	1,110	0,082	1,190	1,022	0,50	0,59	-16
2	2,00	2,90	0,048	0,172	0,124	175	1,060	0,134	1,191	1,034	0,38	0,47	-19
3	2,0	9,80	0,048	0,343	0,295	157	0,964	0,220	1,182	1,086	0,17	0,24	-28
4	2,0	14,7	0,048	0,514	0,467	143	0,890	0,306	1,192	1,167	-0,05	-0,02	-180
5	4,9	2,00	0,120	0,069	-0,052	178	0,108	0,154	1,232	1,009	0,60	0,67	-9,4
6	4,9	49	0,120	0,172	0,052	169	0,103	0,206	1,235	1,020	0,48	0,51	5,0
7	4,9	9,80	0,120	0,343	0,223	157	0,964	0,292	1,255	1,065	0,29	0,29	0,3
8	4,9	14,7	0,120	0,514	0,295	137	0,855	0,378	1,230	1,135	0,06	0,06	7,0
9	9,8	2,00	0,240	0,069	-0,172	143	0,890	0,274	1,160	1,000	0,71	0,73	-1,5
10	9,8	4,90	0,240	0,172	-0,069	137	0,855	0,326	1,180	1,000	0,60	0,63	-4,7
11	9,8	9,80	0,240	0,343	0,103	129	0,808	0,412	1,220	1,030	0,42	0,39	6,2
12	9,8	14,7	0,240	0,514	0,274	118	0,745	0,495	1,239	1,088	0,22	0,16	42,0

Табл. 2 (продолжение)

Номер опыта	T_0 кН	T_1 кН	t_0 кН/мм ²	t_1 кН/мм ²	$t_1 - t_0$ кН/мм ²	P кН	\bar{P}_H кН/мм ²	$t_0 + \frac{t_1}{2}$ кН/мм ²	\bar{P} кН/мм ²	ξ	$M_{пр}$ кН·м	$M'_{пр}$ кН·м	$\frac{M_{пр} - M'_{пр}}{M'_{пр}}$ %
2. $b = 75$ мм, $h_0 = 0,28$ мм, $\lambda = 1,43$, $d = 86,2$ мм													
1	1,0	1,0	0,046	0,065	0,019	412	1,880	0,079	1,960	1,077	0,47	0,50	-4,2
2	1,0	2,5	0,046	0,163	0,117	375	1,755	0,128	1,880	1,090	0,39	0,42	-7,6
3	1,0	4,9	0,046	0,327	0,280	313	1,550	0,210	1,760	1,110	0,25	0,28	-9,6
4	1,0	7,4	0,046	0,490	0,444	264	1,360	0,291	1,650	1,128	0,11	0,17	-35,3
5	2,5	1,0	0,117	0,065	-0,052	378	1,775	0,149	1,925	1,068	0,51	0,50	2,37
6	2,5	2,5	0,117	0,163	+0,047	338	1,635	0,198	1,835	1,080	0,42	0,46	-7,2
7	2,5	4,9	0,117	0,327	0,210	279	1,420	0,280	1,700	1,098	0,28	0,30	-4,0
8	2,5	7,4	0,117	0,490	0,373	235	1,255	0,353	1,610	1,118	0,14	0,16	-13,7
9	4,9	1,0	0,234	0,065	-0,168	312	1,550	0,266	1,815	1,050	0,55	0,49	13,1
10	4,9	2,5	0,234	0,163	-0,070	283	1,430	0,315	1,745	1,058	0,48	0,43	17,5
11	4,9	4,9	0,234	0,327	-0,094	239	1,265	0,397	1,660	1,078	0,35	0,31	13,0
12	4,9	7,4	0,234	0,490	+0,257	206	1,128	0,478	1,605	1,092	0,22	0,22	1,3
13	7,4	4,0	0,350	0,065	-0,284	235	1,245	0,382	1,625	1,022	0,57	0,53	3,9
14	7,4	2,5	0,350	0,163	-0,187	224	1,195	0,432	1,625	1,026	0,51	0,49	5,0
15	7,4	4,9	0,350	0,327	-0,023	199	1,090	0,514	1,600	1,043	0,40	0,37	7,3
16	7,4	7,4	0,350	0,490	0,140	169	0,961	0,595	1,555	1,065	0,28	0,28	2,8

Подсчет момента на валу двигателя по уравнению (1) также производили без учета момента холостого хода стана.

Результаты расчетов момента на валу двигателя, приведенные в табл. 1, показывают их удовлетворительную сходимость с опытными значениями.

Аналогичные расчеты были проведены по формуле (6) с учетом равенства (8) по опытными данным Валквиста и Берга [3], которые представлены в табл. 2. В этой таблице расхождения между расчетными и опытными значениями момента прокатки более значительны. Но это может быть объяснено скорее всего тем, что сами опытные данные, взятые из графиков, являются приближенными. Тем не менее следует отметить, что когда удельное переднее натяжение значительно больше удельного заднего, то расхождения между расчетными и опытными значениями момента прокатки становятся большими.

Из табл. 1 и 2 видно, что эмпирическая зависимость (8) при подсчете момента прокатки с натяжением по формуле (6) дает удовлетворительные результаты, за исключением случаев, когда величина удельного переднего натяжения значительно превосходит значение удельного заднего натяжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Целиков. Теория расчета усилий в прокатных станах, Металлургиздат, 1962.
2. Е. К. Ларке. Прокатка листового и полосового металла, Metallurgizdat, 1959.
3. Г. Валквист, Б. Берг. Исследование влияния натяжения и скорости прокатки на давление металла на валки, расход энергии и опережение при холодной прокатке стальной полосы. Реф. под ред. А. А. Королева. Экспресс-информация, Прокатка и прокатное оборудование, № 13, 1962.
4. В. П. Корж, В. И. Шилов. Аппаратура для исследования процесса ленточной прокатки. Сб. «Исследование процессов ленточной и листовой прокатки», Труды Института металлургии УФАН СССР, вып. 9, Свердловск, 1962.