



УДК 621.771

С.В.Сметанин¹, В.Н.Перетягко²,
А.Б.Юрьев¹, М.В.Филиппова²

¹АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский
металлургический комбинат»
г. Новокузнецк, Россия

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия

E-mail: Sergey.Smetanin@evraz.com

Дата поступления: 01.02.2017

СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ ПРОКАТНОГО СТАНА

Аннотация

В данной работе приведены теоретические и экспериментальные результаты по анализу моментов, возникающих при прокатке трамвайных рельсов в реверсивной непрерывной чистовой группе клетей. С целью более плавной загрузки двигателя и уменьшения динамических ударов при захвате металла валками в период разгона прокатного стана, выполнено исследование по захвату металла валками при постоянной скорости вращения валков. Установлено, что *при захвате металла на постоянной скорости вращения прокатных валков динамический момент, который возникает только в период разгона и торможения вращающихся частей главной линии прокатного стана, отсутствует*. Это позволяет повысить надежность оборудования главной линии прокатного стана. Разработанные скоростные режимы позволили на 20-25% уменьшить момент при захвате металла валками, исключить пробуксовки и динамические удары в главной линии прокатного стана.

Ключевые слова: рельсобалочный стан, непрерывная реверсивная группа, прокатка, трамвайные рельсы, моменты прокатки, динамические моменты, маховой момент, скорость прокатки, ускорение, торможение

Введение

Для расчета мощности двигателя и деталей главной линии прокатного стана (рисунки 1) необходимо знать изменения крутящего момента по времени, то есть построить нагрузочную диаграмму.

В общем случае момент на валу двигателя можно представить как сумму статического и динамического моментов: $M_{\text{ов}} = M_{\text{ст}} \pm M_{\text{дин}}$.

В свою очередь статический момент находится по зависимости:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{хол}}$$

где $M_{\text{пр}}$ - момент прокатки, необходимый для преодоления сопротивления деформации прокатываемого металла и возникающих при этом сил трения между металлом и поверхностью калибра; $M_{\text{тр}}$ - момент сил трения в подшипниках валков и в передаточных механизмах без учета момента, тре-

бующегося для вращения валков вхолостую; $M_{\text{хол}}$ - момент холостого хода, требующийся для вращения валков во время холостого хода.

Если рассматривать основные составляющие крутящего момента при реверсивной прокатке, то статическая составляющая определяется усилием прокатки, трением в подшипниках валков и трением в передаточных механизмах главной линии прокатного стана. Динамическая составляющая определяется силами инерции при разгоне и торможении вращающихся частей стана ($M_{\text{дин. стана}}$), и силами инерции при разгоне или торможении вертикальных валков ($M_{\text{дин. верт}}$) и прокатываемой полосы ($M_{\text{дин. полосы}}$).

Поэтому можно записать как $M_{\text{дин}} = M_{\text{дин. стана}} + M_{\text{дин. верт}} + M_{\text{дин. полосы}}$. В общем случае величину динамического момента можно рассчитать по зависимости:

$$M_{дин} = \frac{GD^2}{375} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где GD^2 - приведенный маховый момент с учетом массы раската; $\frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение (замедление).

Как видно из анализа уравнения (1), динамический момент зависит от производной угловой скорости по времени, следовательно, нагрузочную диаграмму необходимо исследовать совместно со скоростной диаграммой.



Рисунок 1. Чистовая группа клетей

Основная часть

При реверсивном режиме работы прокатного стана диаграмма скоростей складывается из трех периодов: *разгона, установившейся скорости и торможения* [1]. Подробный анализ скоростных режимов прокатки в одноклетевых реверсивных станах был сделан В.А. Тягуновым [2] и В.Н. Выдриным [3]. По этим данным, захват металла валками производится в период разгона двигателя и прокатных валков. В этом случае $M_{ов} = M_{ст} + M_{дин}$, при этом главная линия прокатного стана испытывает большие статические и динамические нагрузки.

Однако, в связи с тем, что современные рельсобалочные прокатные станы имеют значительно лучшие технические характеристики, чем станы предыдущего поколения, необходимы уточнения по выбору скоростных режимов прокатки и построения нагрузочных диаграмм [4, 5]. С целью более плавной загрузки двигателя и уменьшения динамических ударов при захвате металла валками в период разгона прокатного стана выполнено исследование по захвату металла валками при постоянной скорости вращения валков.

В данной работе приведены теоретические и экспериментальные результаты по анализу моментов, возникающих при прокатке трамвайных рельсов в реверсивной непрерывной чистовой группе клетей [5-7].

Рельсобалочный стан ЕВРАЗ ЗСМК имеет непрерывную реверсивную группу клетей, состоящую из двух универсальных клетей UR и UF, между которыми установлена приводная клетя дуо ER. Каждая рабочая клетя имеет индивидуальный безредукторный привод горизонтальных рабочих валков. Вертикальные валки в универсальных клетях UR и UF не приводные. Схема прокатки, применяемая на рельсобалочном стане ЕВРАЗ ЗСМК для производства трамвайных рельсов, следующая: в первом проходе раскат прокатывают в двух клетях UR-ER, валки третьей клетки UF разведены для свободного прохода раската; во втором проходе, после реверса двигателя, раскат прокатывают также в двух клетях ER-UR, валки третьей клетки UF разведены для свободного прохода раската; в третьем проходе раскат прокатывают в трех клетях UR-ER-UF [8-11].

На рисунке 2а приведена диаграмма скоростного режима прокатки, а на рисунке 2б теоретическая нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для первого прохода в клетки UR. Буквами а-з обозначены различные участки диаграммы скоростей, а цифрами от 1 до 9 различные участки нагрузочной диаграммы (диаграммы моментов).

При подходе металла к непрерывной группе клетей автоматически запускается главный двигатель универсальной клетки UR. Разгон валков клетки UR на участке «а-б» происходит от 0 до 152 об/мин. После чего клетя UR автоматически переводится на вращение валков с постоянной скоростью (участок б-в). Захват металла (точка «А») производится на постоянной скорости вращения валков при 152 об/мин. Далее в течение некоторого времени раскат прокатывается с постоянной скоростью (участок А-в). На участке «в-г» происходит дальнейший разгон вертикальных и горизонтальных валков с металлом до максимальной скорости прокатки 297,55 об/мин. Далее

производится прокатка раската с постоянной скоростью вращения валков (участок г-д). В точке «Б» происходит выброс раската из валков, и на участке «Б-д» валки вращаются без металла с постоянной скоростью. Торможение двигателя без металла производится на двух ступенях. Первая ступень на участке «д-е», далее вращение валков с постоянной скоростью (участок е-ж). Вторая ступень торможения на участке «ж-з».

Соответствующая нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) приведена на рисунке 2б. В нагрузочной диаграмме приведены данные по загрузке двигателя прокатного стана в %-так от номинального момента.

Анализируя диаграмму моментов, можно отметить, что нагрузка на двигатель прокатного стана крайне не равномерна.

На участке 1 (соответствует участку «а-б» диаграммы скоростей) происходит разгон валков прокатного стана без металла и момент двигателя равен:

$$M_{дв} = M_{дин1} = \frac{G_1 D^2}{375} \varepsilon_{p1}, \quad (2)$$

где $G_1 D^2$ - приведенный маховый момент главной линии прокатного стана без учета массы раската; ε_{p1} - ускорение двигателя при разгоне валков без металла, об/мин*сек.

На участке 2 (соответствует участку «б-А» диаграммы скоростей) валки вращаются с постоянной скоростью без металла, тогда $M_{дв} = M_{хол}$.

В начале участка 3 (соответствует участку «А-в» диаграммы скоростей) при постоянной скорости вращения валков в точке А скоростной диаграммы происходит захват металла валками и раскат прокатывается с постоянной скоростью, при этом $M_{дв} = M_{ст}$. Таким образом, при захвате металла валками динамический момент отсутствует, что уменьшает возможность динамических ударов.

При разгоне валков с раскатом участок 4 (соответствует участку «в-г» диаграммы скоростей), к статическому моменту добавляется динамический момент:

$$M_{дин} = M_{ст} + \frac{GD^2}{375} \varepsilon_p, \quad (3)$$

где GD^2 - приведенный маховый момент вращающихся частей стана с учетом массы

раската; ε_p - ускорение двигателя при разгоне валков с металлом, об/(мин·с).

Прокатка металла с постоянной скоростью происходит на участке 5 (соответствует участку «г-Б» диаграммы скоростей). В этом случае $M_{дв} = M_{ст}$.

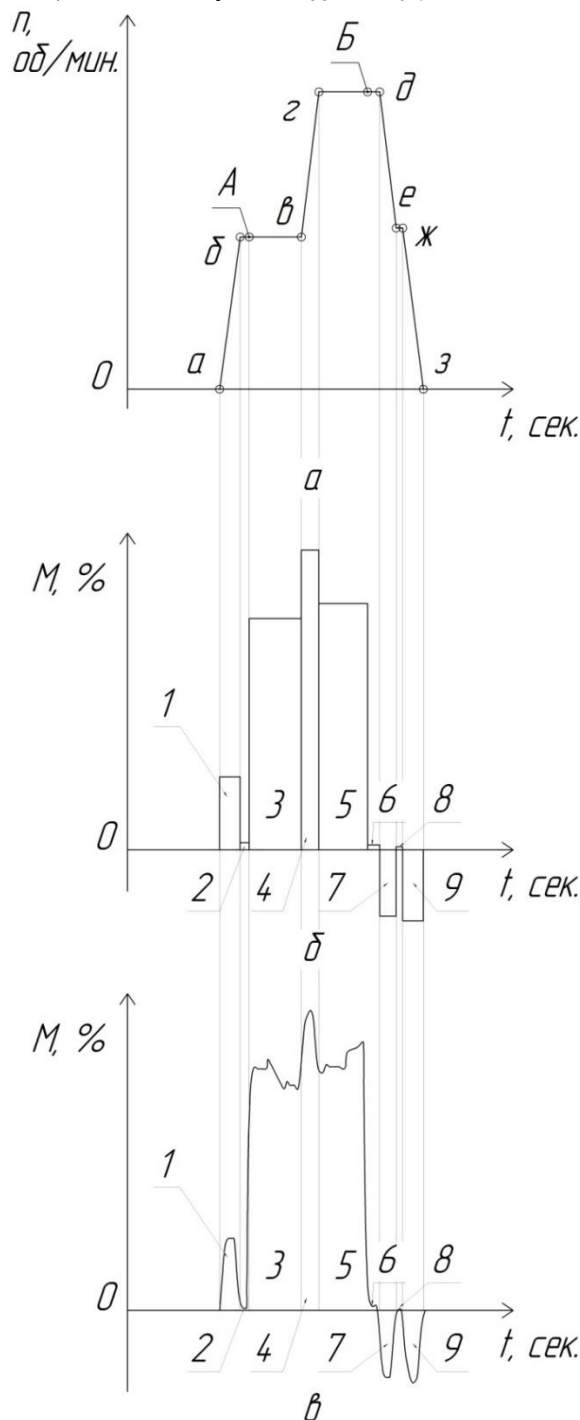


Рисунок 2. Диаграмма скоростей и моментов для первого прохода клетки UR а – диаграмма скоростей; б – теоретическая диаграмма моментов; в – фактическая диаграмма моментов

После выброса раската из клетки валки вращаются на участке 6 (соответствует участку «Б-д» диаграммы скоростей) с постоянной скоростью без металла и $M_{\text{об}} = M_{\text{хол}}$.

Торможение двигателя прокатного стана осуществляется за две ступени, между которыми есть участок вращения валков с постоянной скоростью. При торможении вращающихся частей главной линии прокатного стана без раската, динамический момент торможения становится отрицательным (участок 7 и 9 соответствуют участкам «д-е» и «ж-з» диаграммы скоростей) и

$$M_{\text{об}} = M_{\text{дин.т}} = - \frac{G_1 D^2}{375} \varepsilon_{т1}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{т1}$ - замедление двигателя при торможении валков без металла, об/мин*сек.

Вращение валков с постоянной скоростью между двумя ступенями торможения показано на участке 8, при этом $M_{\text{об}} = M_{\text{хол}}$.

В таблице 1 приведены усредненные данные по крутящим моментам, в % к номинальному, и ускорение двигателя при первом проходе в клетки UR.

При анализе результатов таблицы 1 можно отметить, что динамический момент разгона (участок 1) вращающихся деталей главной линии прокатного стана равен динамическому моменту торможения (участок 7 и 9), т.е. $M_{\text{дин1}} \approx M_{\text{дин.т}}$. Величина момента холостого хода на этапах разгона (участок 2) и торможения (участок 6) валков прокатного стана может отличаться в полтора раза. С увеличением скорости прокатки от 152 об/мин. до 297,55 об/мин (участок 3 и 5) величина статического момента возрастает на 6,5%.

В первом проходе двухвалковая клеть ER совместно клетью UR составляют непрерывную группу клеток, поэтому график скоростей у клетки ER аналогичен графику скоростей клетки UR. Моменты прокатки в этой клетке приведены в таблице 2.

Таблица 1

Моменты прокатки в клетке UR, в % к номинальному, первый проход

Величины	Номер участка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Моменты	$M_{\text{дин1}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{ст}}$	$M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}$	$M_{\text{ст}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{дин.т}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{дин.т}}$
Момент, %	24,25	2,38	77	99,79	82	1,65	-22,09	1,03	-23,69
Ускорение, об/мин*с.	74,15	0	0	83,17	0	0	-82,46	0	-78,78

Таблица 2

Моменты прокатки в клетке ER, в % к номинальному, первый проход

Величины	Номер участка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Моменты	$M_{\text{дин1}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{ст}}$	$M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}$	$M_{\text{ст}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{дин.т}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{дин.т}}$
Момент, %	4,17	0,48	16,68	24,88	18,41	0,35	-4,29	0,35	-4,15
Ускорение, об/мин*с.	85,5	0	0	94,22	0	0	-	0	-
							95,23		88,54

На рисунке 2в приведена экспериментальная нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для первого прохода клетки UR. Можно отметить, что в целом экспериментальные данные соответствуют теоретическим положениям. Некоторые отличия связаны с перепадом температуры по длине раската и особенностями технологии прокатки.

Во втором реверсивном проходе раскат прокатывают в двух клетях ER и UR, валки третьей клетки UF разведены для свободного прохода раската.

На рисунке 3а приведена диаграмма скоростного режима прокатки в клетке UR для второго прохода и теоретическая нагрузочная диаграмма на рисунке 3б. При подходе металла к непрерывной группе клеток

автоматически запускается главный двигатель клетки UR. Разгон валков клетки UR на участке «а-б» происходит от 0 до 132,82 об/мин. После чего клетка UR автоматически переводится на вращение валков с постоянной скоростью (участок «б-в»). Захват металла, точка «А», производится на постоянной скорости вращения валков при 132,82 об/мин. Далее на участке «А-в» происходит прокатка с постоянной скоростью. На участке «в-г» происходит дальнейший разгон вертикальных и горизонтальных валков с металлом до максимальной скорости прокатки 309,92 об/мин. Затем производится прокатка раската с постоянной скоростью вращения валков (участок «г-д»). В связи с большой длиной рельсов перед выбросом производится торможение валков прокатного стана вместе с раскатом. В точке «Б» происходит выброс раската из валков. На участке «д-е» происходит первая ступень торможения валков, далее на участке «е-ж» валки вращаются без металла с постоянной скоростью. Дополнительное торможение двигателя без металла производится на участке «ж-з». Соответствующая нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) приведена на рисунке 2б.

В таблице 3 приведены усредненные данные по крутящим моментам и ускорениям двигателя при втором проходе в клетки UR. Во втором проходе, как и в первом, захват металла валками производится при постоянной скорости вращения валков, т.е., динамический момент вращающихся частей стана, возникающий только при разгоне и торможении, при захвате отсутствует.

Двухвалковая клетка ER совместно клетку UR составляют непрерывную группу клеток, поэтому график скоростей у клетки ER аналогичен графику скоростей клетки UR. Моменты прокатки в этой клетке приведены в таблице 4.

На рисунке 3в приведена экспериментальная нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для второго прохода клетки UR. Можно отметить, что в целом экспериментальные данные соответствуют теоретическим положениям. Некоторые отличия связаны с перепадом температуры по длине

раската и некоторыми особенностями технологии прокатки.

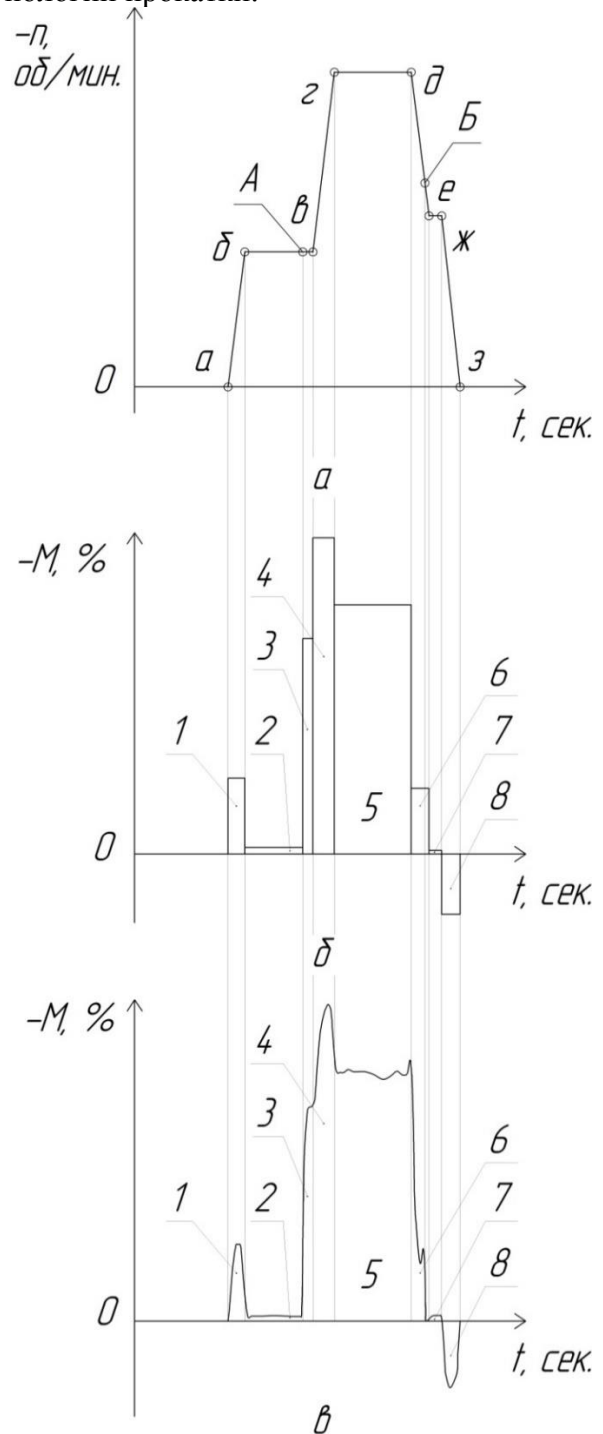


Рисунок 3. Диаграмма скоростей и моментов для второго прохода клетки UR а – диаграмма скоростей; б – теоретическая диаграмма моментов; в – фактическая диаграмма моментов; знак «-» означает реверс двигателя

Таблица 3

Моменты прокатки в клети UR, в %-тах к номинальному, второй проход

Величины	Номер участка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Моменты	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{ст} + M_{дин}$	$M_{ст}$	$M_{дин.т}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Момент, %	-24,9	-2,13	-70,7	-103,81	-81,78	-21,5	-1,2	19,81
Ускорение, об/мин*с.	80,5	0	0	84,33	0	-81,3	0	-77,8

Таблица 4

Моменты прокатки в клети ER, в %-тах к номинальному, второй проход

Величины	Номер участка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Моменты	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{ст} + M_{дин}$	$M_{ст}$	$M_{дин.т}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Момент, %	-4,05	-0,41	-6,98	-10,89	3,98	3,11	-0,41	3,8
Ускорение, об/мин*с.	69,68	0	0	74	0	-70,01	0	-80,06

В третьем проходе раскат прокатывают в трех клетях UR, ER и UF. На рисунке 4а приведена диаграмма скоростного режима прокатки в клети UR для третьего прохода. При подходе металла к непрерывной группе клеток автоматически запускается главный двигатель клеток UR, ER и UF. Разгон валков клети UR на участке «а-б» происходит от 0 до 183,44 об/мин, клети ER от 0 до 204,02 об/мин, клети UF от 0 до 216,77 об/мин. После чего все три клетки автоматически переводятся на вращение валков с постоянной скоростью (участок «б-в»). Захват металла (точка «А») производится на постоянной скорости вращения валков, поэтому $M_{дин. стана}$ отсутствует. Далее производится прокатка раската с постоянной скоростью вращения валков (участок «А-Б»). В точке «Б» происходит выброс раската из валков и на участке «Б-в» валки вращаются без металла с постоянной скоростью. Торможения двигателя без металла производится на участке «в-г».

Соответствующая нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для третьего прохода клети UR приведена в нижней части рисунка 4б.

В таблице 5 приведены усредненные данные по крутящим моментам, в %-тах к номинальному, при третьем проходе в клетях UR, ER и UF.

Таблица 5

Моменты прокатки в клетях UR, ER и UF, в %-тах к номинальному, третий проход

Величины	Номер участка				
	1	2	3	4	5
Моменты, %	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Клеть UR	21,4	2,25	79,29	1,3	-19,65
Клеть ER	3,9	0,42	11,5	0,31	-4,3
Клеть UF	25,1	1,23	63	1,1	-21,8

На рисунке 4в, приведена экспериментальная нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для третьего прохода клетки UR. На основании экспериментальных данных, из-за неравномерности температуры по длине раската, можно отметить увеличение крутящего момента по ходу прокатки.

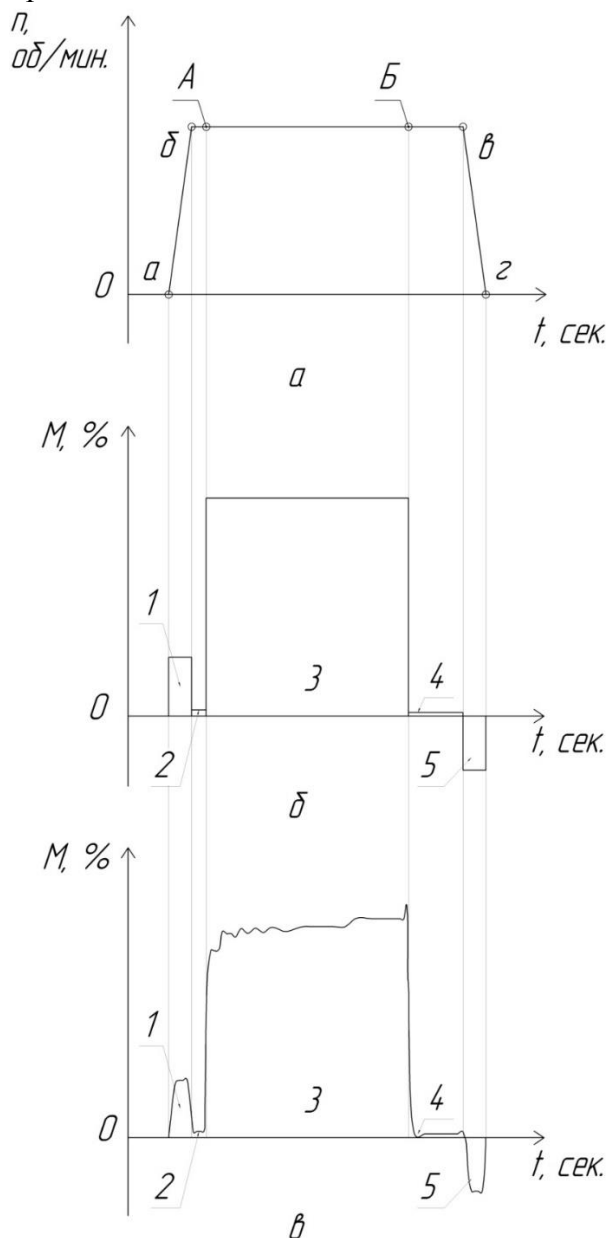


Рисунок 4. Диаграмма скоростей и моментов для третьего прохода клетки UR
 а – диаграмма скоростей; б – теоретическая диаграмма моментов;
 в – фактическая диаграмма моментов

Заключение

Динамическая составляющая крутящего момента ($M_{\text{дин}}$) на валу главного привода прокатного стана необходима для преодоления сил инерции при разгоне и торможении вращающихся частей стана ($M_{\text{дин, стана}}$), сил инерции при разгоне и торможении вертикальных валков ($M_{\text{дин, верт}}$) и прокатываемой полосы ($M_{\text{дин, полосы}}$). В данной статье предложен способ прокатки, в котором захват металла осуществляется при постоянной частоте вращения прокатных валков – это позволяет, в момент захвата металла, исключить влияние динамического момента вращающихся частей прокатного стана ($M_{\text{дин, стана}}$). Поскольку масса вертикальных валков и масса раската в сумме составляют менее 3% от массы вращающихся частей прокатного стана ($M_{\text{дин, стана}}$), соответственно увеличение динамического момента от вертикальных валков ($M_{\text{дин, верт}}$) и динамического момента полосы ($M_{\text{дин, полосы}}$) является незначительным.

Разработанные скоростные режимы прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клеток позволили на 20-25% уменьшить момент при захвате металла валками за счет отсутствия динамического момента при постоянном числе оборотов вращающихся частей прокатного стана. В связи с тем, что линейная скорость вращения прокатных валков совпадает с линейной скоростью задачи раската в калибр, это позволило исключить пробуксовки раската в калибре и снизить динамические удары в главной линии прокатного стана.

Предложенный способ прокатки позволяет повысить надежность оборудования главной линии прокатного стана, а по результатам экспериментальных и эксплуатационных показателей увеличилась стойкость прокатных валков.

Библиографический список

1. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320с.
2. Тягунов В.А. Режимы прокатки на реверсивных станах. – Свердловск, М.: Металлургиздат, 1954 – 136с.
3. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов. – Свердловск.: Металлургиздат, 1960 – 256с.
4. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Литвинов Р.А. Скоростные режимы прокатки рельсов в непрерывных группах клетей современного рельсобалочного стана – Производство проката, 2008, №7 – С. 30-33.
5. Головатенко А.В., Волков К.В., Дорофеев В.В., Степанов С.В., Добрянский А.В. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов – Производство проката – 2014 - №2 – с. 25-39.
6. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В. Особенности прокатки трамвайных желобчатых рельсов в четырехвалковых калибрах // Бюллетень Черная металлургия – 2016. - №10. – С.47-52
7. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Юрьев А.Б. Исследование закономерностей приращения и утяжки фланцев трамвайного рельса при прокатке в четырехвалковых калибрах // Черные металлы – 2016. - №10. – С.44-49
8. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В. Новая технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов. - Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. - №5. – С. 328 - 335
9. Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V., Filippova M.V. New rolling technology for streetcar girder rail. - Steel in Translation 2015, Volume 45, Issue 5, - pp. 312-317/
10. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В. Энергоэффективная технология прокатки рельсов в четырехвалковых калибрах/ - Металлург – 2016. - №7. – С. 54 – 59
11. Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Energy-efficient four-roll rail rolling technology. - Metallurgist – November 2016 – Volume 60 – Issue 7 – pp 699–705

Information about the paper in English

**S.V. Smetanin¹, V.N. Peretyat'ko²,
A.B. Yuriev¹, M.V. Filippova²**

¹EVRAZ plc.

²Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation

E-mail: Sergey.Smetanin@evraz.com

Received 04.05.2017

DECREASING THE DYNAMIC MOMENTS AND INCREASING THE RELIABILITY OF THE ROLLING MILL

Abstract

This article describes the results of theoretical research and experimental study of the moments that occur in a continuous reversing finishing mill used for tram rails. For a softer start of the motor and to reduce the impact produced by the mill rolls when they grab the material during the mill ramp-up, a study was conducted that looked at the fixed speed rolls grabbing the material. It was established that no dynamic moment, which may only occur during a ramp-up or a ramp-down, occurs when the rolls turn at constant RPMs. This can help increase the reliability of the rolling mill components. The established speed regimes helped achieve a 20-25% reduction of the moment during the material capture and prevent slipping or impact loads in the rolling mill.

Keywords: rail-and-structural steel mill, continuous reversing train, rolling, tram rails, rolling torques, dynamic moment, flywheel moment, rolling speed, ramp-up, ramp-down.
