

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

ОЦЕНКА ПРИЧИН И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ 2000 ОАО «ММК»

Румянцев М.И.¹, Шубин И.Г.¹, Горбунов А.В.², Лукьянов С.А.²,
Митасов В.С.¹, Насонов В.В.², Егоров В.Н.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

² Магнитогорский металлургический комбинат, Россия

Аннотация. В статье выполнено сравнение параметров стабильных и нестабильных режимов при прокатке стали СтЗпс методами математической статистики. На основе анализа результатов сравнения разработано несколько режимов для различной толщины подката в соответствии с различными стратегиями. С учётом известных ограничений выбирается требуемая толщина подката и оптимальный режим прокатки.

Ключевые слова: статистика, вибрация, холодная прокатка, автоматизированное проектирование, стратегия прокатки.

Введение

В период освоения совмещённого травильно-прокатного агрегата 2000 ЛПЦ-11 ОАО «ММК» [1] была затруднена прокатка полос стали СтЗп с размерами 0,35x1275 мм. В частности, наблюдалась повышенная обрывность полос, а при достижении скорости 450 м/мин появлялся низкий звук, который, как известно, является одним из проявлений вибрации в рабочих клетях [2]. Так как известно, что появление вибрации может быть связано с режимами прокатки, выполнили сравнение режимов, при которых достижение требуемой скорости прокатки было затруднено (27 рулонов), с режимами, при прокатке которых была достигнута скорость 670 м/мин (53 рулона).

Техническая разработка

Оценку различий параметров устойчивого и неустойчивого процессов выполняли в среде MS Excel с применением инструмента «Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями» из надстройки «Анализ данных». В соответствии с данной методикой [3], на основании средних значений и стандартных отклонений сравниваемых выборок, вычисляют t -статистику и сравнивают ее с односторонним t_α и двусторонним

$t_{\alpha/2}$ критическими значениями распределения Стьюдента (здесь α – уровень значимости). Если выполняются условия $|t| \geq t_\alpha$ или $|t| \geq t_{\alpha/2}$, то отличия средних в сравниваемых выборках являются существенными. Сначала критические значения распределения Стьюдента находили при доверительной вероятности 95%, что соответствует уровню значимости $\alpha = 5\%$ (или $=0,05$). В случае, когда условия существенности различия средних не выполняются, но значения рассчитанного t и табличных (t_α или $t_{\alpha/2}$) чисел Стьюдента близки, понижали доверительную вероятность и повторяли тест. Результаты оценивания приведены в табл. 1.

Сравнение распределений обжатий (рис. 1, а) показало, что в 1, 3 и 5 клетях обжатия в неустойчивом процессе превышают значения, которые наблюдались в устойчивом процессе. В 2 и 4 клетях обжатия в неустойчивом процессе, наоборот, меньше, чем при устойчивом процессе. Для клеток 1, 2 и 4 эти различия являются существенными с доверительной вероятностью 95%, для клетки 3 и 5 с доверительными вероятностями 88 и 92% соответственно (табл. 1).

Натяжения на входе в клеть 1 и в том, и в ином случае приблизительно равны (рис. 1, а),

так же как и натяжения между 5 клетью и моталкой (рис. 1, б). В то же время межклетевое натяжение при неустойчивом процессе больше, чем при устойчивом. Для всех клетей натяжение на входе, а для клетей 1-3 натяжение на выходе имеет существенные различия с доверительной вероятностью 95%. Натяжение на выходе клетей 4 и 5 имеет существенные различия при доверительными вероятностями 86 и 88% соответственно (см. табл. 1).

Указанные особенности режимов обжатия и натяжений проявляются в отличиях распределения усилий прокатки (рис. 1, г). В обоих случаях усилия прокатки от клетки 1 до клетки 4 возрастают, а в клетях 5 резко снижаются. Однако в клетях 3 и 5 усилия прокатки при неустойчивом процессе больше, чем при устойчивом, и указанные различия являются значимыми с доверительной вероятностью 95% (см. табл. 1).

Результаты анализа дали основание предпо-

ложить, что для обеспечения устойчивости процесса необходимо изменить режим обжатий, а также снизить межклетевые натяжения. При этом указанная коррекция должна обеспечить разгрузку клетей 3 и 5 по усилию прокатки.

Для совершенствования режима прокатки выполнили автоматизированное проектирование с применением программы CRCAD [4]. Рассматривали прокатку из подката толщиной 1,6; 1,8 и 2,0 мм по 2 вариантам. В первом варианте (P1) обжатия распределялись таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение коэффициента выравнивания продольной разнотолщинности. Прокатанный по таким режимам металл будет иметь наиболее высокую точность по толщине. Во втором варианте (P2) обжатия распределялись таким образом, чтобы разогрев металла в результате пластической деформации был минимальным. При прокатке по таким режимам уменьшается вероятность образования дефектов поверхности проката, обусловленных термической деструкцией технологической смазки. Также были выполнены расчеты параметров прокатки по режиму неустойчивого процесса (далее – P3).

В отличие от режима, который использовался на стане (на всех графиках ему соответствует линия 3), для разработанных режимов характерны пониженные обжатия в клетях 1 и 4 при более высоких обжатиях в клетях 2 и 3 (рис. 2). В последней, пятой, клетки обжатия по всем режимам практически совпадают.

Таблица 1

Статистические оценки результатов сравнения параметров

Оценка	Клеть 1		Клеть 2		Клеть 3		Клеть 4		Клеть 5	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Обжатие, %										
$\bar{x}$	29,6	28,1	31,7	33,0	33,3	31,4	20,5	31,9	7,4	5,7
s	4,25	0,48	8,38	1,29	8,07	1,15	8,47	0,99	4,43	0,96
t	2,363		-1,093		1,662		-8,999		1,935	
t_{α}	1,675		1,674		1,188 ⁸⁶⁾		1,678		1,445 ⁹²⁾	
$t_{\alpha/2}$	2,007		2,005		1,580 ⁸⁸⁾		2,012		1,819 ⁹²⁾	
Заднее натяжение, Н/мм ²										
$\bar{x}$	90,2	89,0	208,6	169,0	243,6	194,6	296,4	222,8	282,5	264,7
s	11,1	8,0	32,2	10,4	57,0	12,3	87,9	13,2	96,7	15,2
t	0,771		8,022		5,824		5,570		0,929	
t_{α}	1,676		1,668		1,672		1,677		1,706	
$t_{\alpha/2}$	2,009		1,996		2,002		2,011		2,056	
Переднее натяжение, Н/мм ²										
$\bar{x}$	208,6	169,0	243,1	194,6	280,7	222,8	288,4	264,7	70,4	63,5
s	32,2	10,4	56,6	12,3	104,4	13,2	100,1	15,2	21,0	2,4
t	8,022		5,850		3,863		1,576		1,675	
t_{α}	1,668		1,672		1,675		1,092 ⁸⁶⁾		1,203 ⁸⁸⁾	
$t_{\alpha/2}$	1,996		2,002		2,007		1,500 ⁸⁶⁾		1,608 ⁸⁸⁾	
Усилие прокатки, МН										
$\bar{x}$	13,22	13,15	13,11	13,16	15,50	14,04	17,38	17,77	9,01	6,66
s	1,52	1,00	1,49	0,31	3,16	0,67	5,04	1,32	2,03	1,71
t	0,263		-0,236		3,123		-0,504		4,531	
t_{α}	1,666		1,672		1,672		1,673		1,677	
$t_{\alpha/2}$	1,993		2,002		2,002		2,004		2,010	
Примечания:										
$\bar{x}$ и s – среднее выборочное значение и выборочное стандартное отклонение;										
86), 88) и 92) – значения доверительной вероятности,										
при которых средние значения сравниваемых выборок могут быть признаны различающимися существенно.										

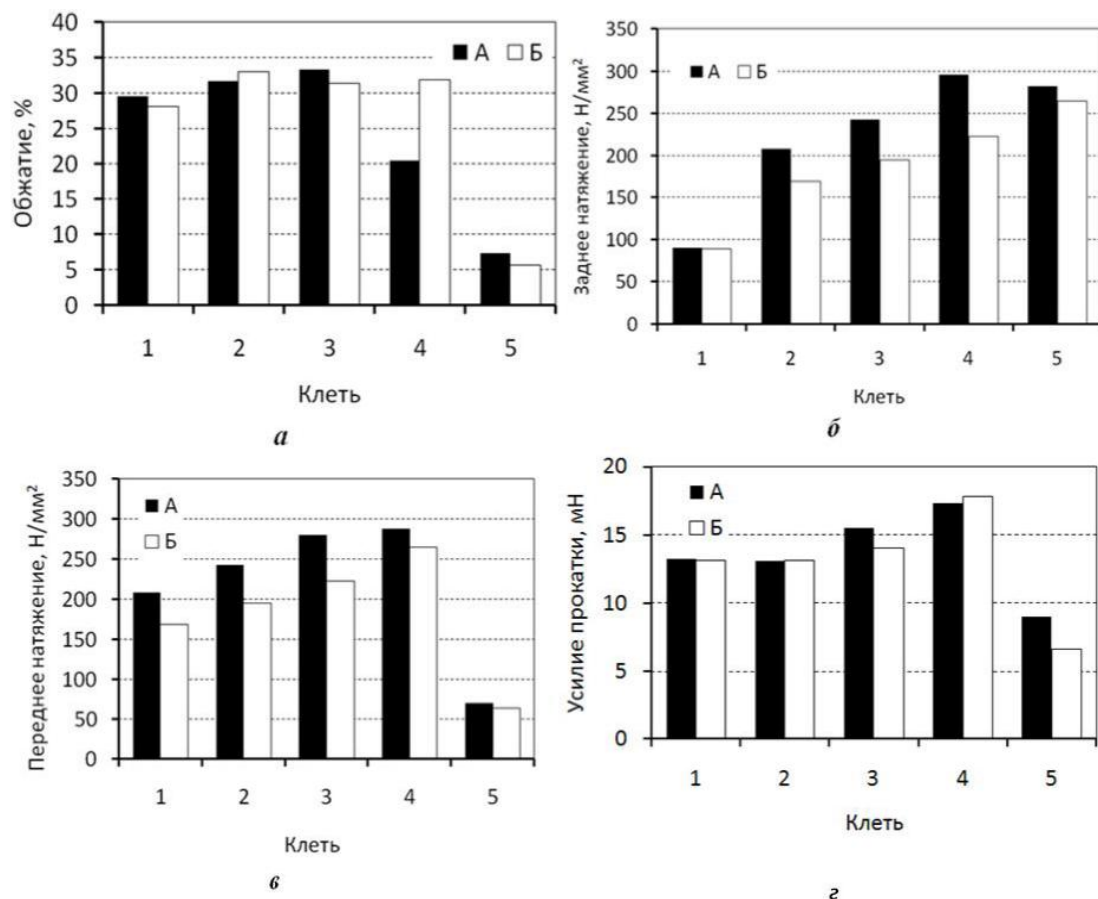


Рис. 1. Распределения обжатий (а), натяжений (б, в) и усилий прокатки (г) при устойчивом (А) и неустойчивом (Б) процессах

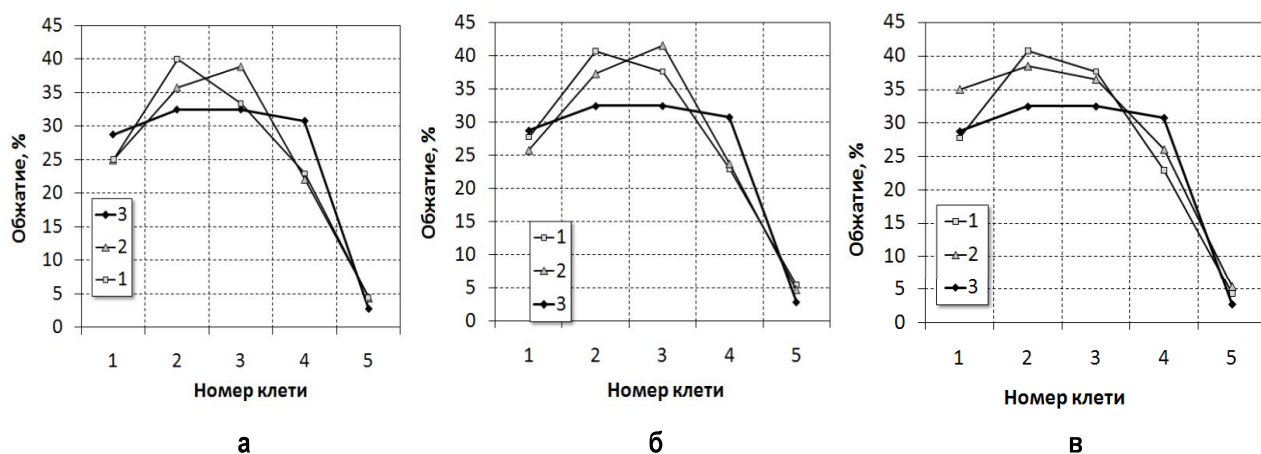


Рис. 2. Режимы обжатий при прокате полосы 0,35×1275 мм стали СтЗпс из подката толщиной 1,6 (а); 1,8 (б) и 2,0 (в): 1 – по стратегии наибольшего выравнивания разнотолщинности (P1); 2 – по стратегии минимального разогрева (P2); 3 – фактическая прокатка на стане из подката толщиной 1,6 мм (P3)

Особенностью предлагаемых режимов является применение более низких натяжений (линии 1 и 2 на рис. 3). В действующем режиме (линия 3) межклетевые натяжения возрастают от 200 Н/мм² в первой клетке до 290 в четвертой и снижаются до 70 Н/мм² на выходе из клетки 5. При этом на выходе из клетки 1 натяжение достигает 0,44 от предела текучести, а от клетки 2 до клетки 4 уровень натяжения возрастает от 0,32 до 0,38. Такой режим натяжений создаёт предпосылки к порывам полосы в межклетевых промежутках (максимальным допустимым значением уровня натяжений считают 0,35) [5]. В разработанных режимах натяжения также возрастают от клетки 1 к клетке 4, но их величине (150-200 Н/мм²) соответствует более низкий уровень натяжения (0,25-0,35), что снижает вероятность обрывов полосы.

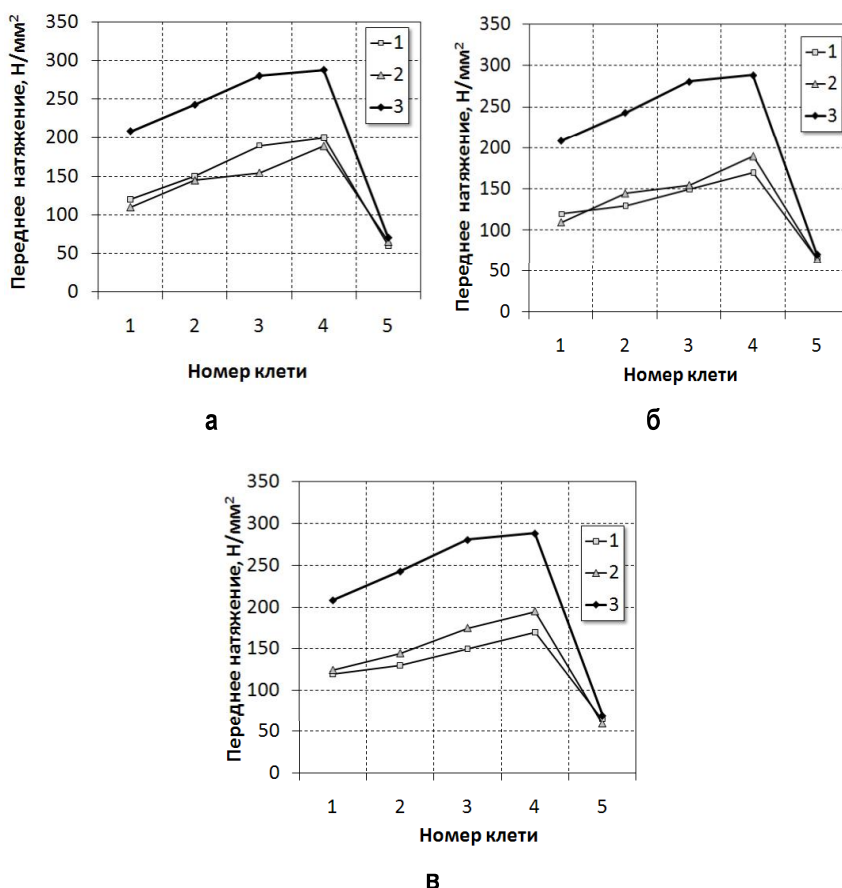


Рис. 3. Режимы натяжений при прокатке полосы 0,35×1275 мм стали СтЗпс из подката толщиной 1,6 (а); 1,8 (б) и 2,0 (в): 1 – по стратегии наибольшего выравнивания разнотолщинности (Р1); 2 – по стратегии минимального разогрева; 3 – фактическая прокатка на стане из подката толщиной 1,6 мм

Существенным ограничением на скорость холодной прокатки является термическая стойкость технологической смазки. Известно [6], что

если температура металла превысит 180-200°C, то смазочные свойства эмульсии ухудшаются, а на отдельных участках поверхности контакта могут возникать условия сухого трения. Наличие подобных участков может стать источником вибрации в системе «валки-полоса» [7].

В режимах, разработанных по стратегии минимального разогрева, максимальная температура полосы прогнозируется в пределах от 160 до 170°C (линии 2 на рис. 4). В случае применения подката толщиной 1,8-2,0 мм такой эффект достигается при скорости прокатки не более 600 м/мин. Прокатка по данной стратегии из подката толщиной 1,6 мм возможна со скоростью до 840 м/мин.

В режимах, разработанных по стратегии максимального выравнивания разнотолщинности (линия 1 на рис. 4), ограничение по температуре полосы выполняется при более высоких скоростях (990, 840 и 660 м/мин для подката толщиной 1,6; 1,8 и 2 мм соответственно).

Другим источником вибраций в системе «валки-полоса» могут быть кратковременные пробуксовки рабочих валков по полосе. Характеристикой устойчивости процесса против пробуксовки приняли отношение нейтрального угла γ к углу захвата α . Пробуксовка наступает, когда $\gamma/\alpha = 0$ [8]. Оценка устойчивости процесса против пробуксовки рабочих валков (рис. 5) показывает, что при использовании подката толщиной 1,8 мм стратегия наибольшего выравнивания разнотолщинности (линия 2 на рис. 5, б) в клетях 1 и 2 повышает отношение нейтрального угла к углу контакта до 0,12-0,15, в то время как в других случаях для тех же клеток находится в пределах 0,10-0,12. Следовательно, режим прокатки полос толщиной 0,35 мм из подката 1,8 мм по режиму наибольшего выравнивания продольной разнотолщинности обладает наиболее высоким

запасом устойчивости против пробуксовки рабочих валков. Итоговые показатели прокатки по различным режимам представлены в табл. 2.

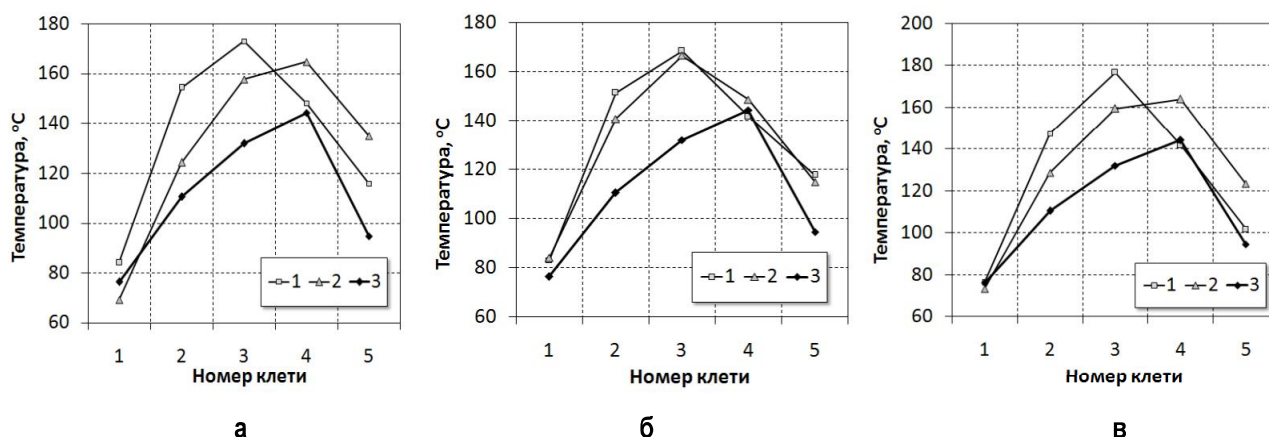


Рис. 4. Температура металла при прокатке полосы 0,35×1275 мм стали СтЗпс из подката толщиной 1,6 (а), 1,8 (б) и 2,0 (в): 1 – по стратегии наибольшего выравнивания разнотолщинности (P1); 2 – по стратегии минимального разогрева (P2); 3 – фактическая прокатка на стане из подката толщиной 1,6 мм

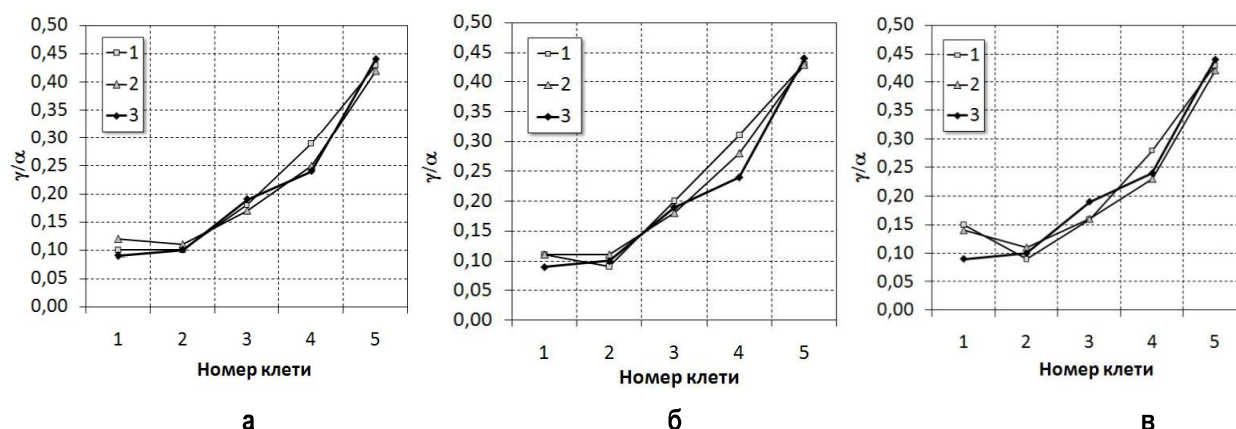


Рис. 5. Запас устойчивости против пробуксовки рабочего вала при прокатке полосы 0,35×1275 мм стали СтЗпс из подката толщиной 1,6 (а), 1,8 (б) и 2,0 (в): 1 – по стратегии наибольшего выравнивания разнотолщинности (P1); 2 – по стратегии минимального разогрева; 3 – фактическая прокатка на стане из подката толщиной 1,6 мм

Таблица 2
Оценки режимов прокатки полосы 0,35×1275 мм из стали СтЗпс

Толщина подката, мм	Скорость, м/мин				Общий коэффициент выравнивания		Максимальная температура, °С		Минимальное отношение γ/α	
	травления		прокатки							
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Режим прокатки на стане										
1,6	210		630		0,825		148		0,10	
Разработанные режимы прокатки										
1,6	210	210	990	840	0,915	0,921	166	169	0,10	0,12
1,8			840	600	0,914	0,939	174	173	0,10	0,13
2,0			660	600	0,894	0,991	177	161	0,11	0,11

Наиболее результативным можно считать режим прокатки по стратегии выравнивания продольной разнотолщинности из подката толщиной 1,8 мм. Для него характерны достаточно высокие скорость прокатки (840 м/мин) и общий коэффициент выравнивания (0,939). Такой режим обладает наиболее высокой устойчивостью против пробуксовки валков в первых двух клетях ($\gamma/\alpha \geq 0,13$) при допустимом разогреве металла ($t_{max}=170-180^{\circ}\text{C}$).

Вывод. На основании статистического сравнения параметров устой-

чивого и неустойчивого процессов холодной прокатки тонких полос на стане 2000, совмещенном с непрерывным травильным агрегатом, выявлены направления совершенствования режимов прокатки с целью предотвращения причин вибрации рабочих клетей стана. С применением автоматизированного проектирования разработан режим прокатки полосы 0,35×1275 мм из стали Ст3пс, обеспечивающий снижение обрывности, а также достаточно высокую устойчивость против пробуксовки валков при допустимом разогреве металла, что позволяет повысить скорость прокатки с 450 до 840 м/мин.

Список литературы

1. Опыт освоения производства холоднокатаного проката в ЛПЦ-11 / Ласков С.А., Горбунов А.В., Лукьянов С.А., Голубчик Э.М., Румянцев М.И. // Совершенствование технологии в ОАО «ММК»: сб. науч. тр. Вып. 16. Магнитогорск: ОАО «Полиграфия», 2011. С. 299-302.
2. Гарбер Э.А. и др. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов // Производство проката. 2003. №1. С. 10-12.
3. Статистика. Теория и практика в Excel / Лялин В.С., Зверева И.Г., Никифорова Н.Г. М.: Финансы и статистика, 2010. 448 с.
4. Моделирование процесса холодной прокатки с целью разработки технологий производства высокопрочного холоднокатаного проката для автомобилестроения / Румянцев М.И., Митасов В.С., Горбунов А.В. // Совершенствование технологии в ОАО «ММК»: сб. науч. тр. №14. Магнитогорск, 2009. С. 322-332.
5. Методы выбора режимов и расчёта параметров при автоматизированном проектировании тонколистовой прокатки / Салганик В.М., Медведев Г.А., Румянцев М.И. и др. // Труды третьего конгресса прокатчиков. М.: Металлургия, 1979. 232 с.
6. Кузнецов Л.А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки. М.: Металлургия, 1988. 304 с.
7. Пименов В.А. О причинах нарушения устойчивости холодной прокатки // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 1990. №8. С. 36-38.
8. Василёв Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчёта параметров холодной прокатки. М.: Металлургия, 1995. 368 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ASSESSMENT OF THE CAUSES AND DEVELOPMENT OF THE MEASURES FOR OVERCOMING THE COLD ROLLING INSTABILITY ON CONTINUOUS MILL 2000 OF OJSC MMK

Rumyantsev Mikhail Igorevich – Ph.D. (Eng), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: mihigrum@rambler.ru.

Shubin Igor Gennadievich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: Shubin64@mail.ru.

Gorbunov Andrey Victorovich – Head of Laboratory of High-strength Steels, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC, Russia. E-mail: Gorbunov.av@mmk.ru.

Lukyanov Sergey Anatolievich – Deputy Head of the Cold Complex, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC, Russia. E-mail: lukyanov.sa@mmk.ru.

Mitasov Vladimir Sergeevich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: v.s.mitasov@gmail.com.

Nasonov Vadim Vyacheslavovich – Engineer of Cold Rolling Laboratory, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC, Russia. E-mail: Nasonov.vv@mmk.ru.

Egorov Viktor Nikolaevich – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: EgorovVN74@yandex.ru.

Abstract. This paper compares parameters of stable and unstable rolling modes for St3ps steel grade applying methods of mathematical statistics. Based on analysis of comparison results several modes were designed for different hot-rolled strip thickness in accordance with various strategies. Optimal rolling schedule and thickness of hot-rolled strip were determined considering existing limitations.

Keywords: statistics, vibration, cold rolling, computer aided design, strategy of rolling

References

1. Laskov S.A., Gorbunov A.V., Lukyanov S.A., Golubchik E.M., Rumyantsev M.I. Experience of developing the production of cold-rolled products at CRC-11. *Sovershenstvovanie tekhnologii v ОАО «ММК»* [Technology improvement at OJSC MMK]. Magnitogorsk: Poligrafia, 2011, iss. 16, pp. 290-302.
2. Garber E.A. and others. Investigation of the vibration causes in the stands of continuous rolling mill. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2003, no. 1, pp. 10-12.
3. Lyalin V.S., Zverev I.G., Nikiforova N.G. *Statistika. Teoriya i praktika v Excel* [Statistics. Theory and Practice in Excel]. Moscow: Finance and Statistics, 2010, 448 p.
4. Rumyantsev M.I., Mitasov V.S., Gorbunov A.V. Simulation of the cold rolling process in order to develop technologies for high-strength cold-rolled steel for automotive industry. *Sovershenstvovanie tekhnologii v ОАО «ММК»* [Technology improvement OJSC MMK]. 2009, no. 14, pp. 322-332.
5. Salganik V.M., Medvedev G.A., Rumyantsev M.I. etc. The choice methods for modes and for parameters calculation in the computer aided design of sheet rolling. *Trudy tret'ego kongressa prokatchikov* [Proceedings of the third congress]. Moscow: Metallurgy, 1979. 232 p.

6. Kuznetsov L.A. *Primenenie UVM dlya optimizacii tonkolistovoj prokatki* [Computer application for optimization of sheet rolling]. Moscow: Metallurgy, 1988. 304 p.
7. Pimenov V.A. About the causes of cold rolling stability loss. *Izvestiya vuzov. Chyornaya metallurgiya* [Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy], 1990, no. 8, p. 36-38.
8. Vassilev J.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy raschyota parametrov holodnoj prokatki* [Engineering models and algorithms for calculating the parameters of cold rolling]. Moscow: Metallurgy, 1995. 368 p.

УДК 621.777: 621.777.22

РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЗОНЫ ОБЖАТИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Курмачев Ю.Ф., Соколов Р.Е., Высотина А.А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы расчета продольного профиля зоны обжатия при холодной периодической прокатке труб из алюминиевых сплавов в зависимости от заданной функции изменения степени деформации.

Ключевые слова: труба, прокатка, периодическая прокатка, степень деформации, заготовка, профиль, калибровка, прокатные валки, ручей, расчет, алюминий, сплав.

Введение

Холоднокатанные трубы из цветных металлов и сплавов занимают важное место в современной промышленности. Трубы из алюминиевых сплавов широко применяются в качестве изделий ответственного назначения в авиационной и космической технике.

Следует отметить, что процесс проектирования инструментальной оснастки при разработке технологии холодной прокатки труб (ХПТ) сопряжен с проведением большого объема вычислений, связанных с определением продольного профиля ручья калибра.

На сегодняшний день из технической литературы [1, 2] известен ряд методик расчета калибровок инструмента станов ХПТ, наиболее распространенными из которых являются методики НИТИ-НТЗ, МИСиС и УралНИТИ. Они широко применяются в производстве стальных и титановых труб, однако не предполагают точного аналитического решения поставленной задачи из-за принятия ряда допущений при её постановке.

В связи с этим актуальной становится задача по разработке методики точного расчета продольного профиля зоны обжатия при холодной периодической прокатке труб из алюминиевых сплавов по заданной функции изменения степени деформации.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Введем следующие обозначения; L – длина обжимной зоны; $D(x)$ – диаметр трубы в точке x ; D – диаметр заготовки; d – диаметр готовой трубы; $t(x)$ – толщина стенки трубы; $do(x)$ – диаметр оправки; $F(x)$ – площадь поперечного сечения трубы; $F_0 = F(0)$ – площадь поперечного сечения заготовки; $F_1 = F(L)$ – площадь поперечного сечения готовой трубы; μ – суммарная вытяжка, равная отношению $\frac{F_0}{F_1}$; $\varepsilon(x)$ – относительная частная деформация; m – подача заготовки.

Профиль обжимной зоны ручья калибра определяется изменением площади поперечного сечения, диаметра и толщины стенки трубы по длине зоны обжатия. Оправка, заданная известной функцией (линейной – коническая, либо нелинейной – так называемая «фигурная»), позволяет свести характеристику профиля обжатия лишь к изменению площади поперечного сечения, так как, зная диаметр оправки $do(x)$ и