

**И.Ю.Приходько**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины,*

**ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
ПЛОСКОСТНОСТЬЮ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС ПРИ  
СЕЛЕКТИВНОЙ ПОДАЧЕ ЭМУЛЬСИИ**

Целью работы является выявление показателей и сравнительной эффективности управления плоскостностью полос при селективной подаче эмульсии на современном непрерывном стане холодной прокатки. Анализ проводили с применением математической модели и формальных подходов к оценке соответствия плоскостности полос заданным параметрам для отдельных позиций сортамента. Установлено, что на 95,4% площади прокатываемых полос отношение предельных величин неплоскостности при работающей и неработающей системе селективной подачи эмульсии составляет 0,44–0,7. Примерно половина допусков по плоскостности прокатываемых полос зависит от работы системы подачи эмульсии, которая в условиях современного промышленного стана является высокоэффективным средством улучшения показателей работы систем автоматического регулирования плоскостности.

**Ключевые слова:** Стан холодной прокатки, охлаждение валков, селективная подача эмульсии, плоскостность, математическая модель, управления

Современные системы автоматического регулирования плоскостности (САРП) полос при холодной прокатке, как правило, располагают каналом управления селективной подачей эмульсии (СПЭ) – рис.1. Эффективность работы этого канала во многом определяет показатели САРП.

**Целью работы** является выявление показателей и сравнительной эффективности управления плоскостностью полос при селективной подаче эмульсии на современном непрерывном стане холодной прокатки.

Интерес представляют численные сравнительные экспериментальные данные об эффективности работы САРП с использованием СПЭ и без. Во втором случае подача эмульсии осуществляется равномерно без её перераспределения по длине бочки валков. Такие оценки были выполнены для условий пятиклетевого стана холодной прокатки 2030 НЛМК. Сравнивали два трёхдневных периода эксплуатации стана с работающей и неработающей системой СПЭ.



Рис. 1 Коллектор селективной подачи эмульсии.

**Методика исследования.** Анализ проводили с применением 2-х формальных подходов к оценке доли соответствия заданным предельным величинам неплоскостности (выраженных в международных единицах IU) для отдельных позиций сортамента:

1. *По длине полосы.* Если хотя бы одно значение в порции измеренных значений неплоскостности по ширине полосы превысило предельный уровень, то «выбраковывается» весь соответствующий участок по длине полосы. Доля кондиционной длины определяется как отношение длины участка полосы, где ни одно значение неплоскостности не превышает предельного значения, к общей длине полосы. Данный подход формально соответствует общепринятым условиям формулирования гарантий в отношении плоскостности производимой продукции.

2. *По площади полосы.* «Выбраковываются» только те участки по длине и ширине полосы, где измеренные значения неплоскостности превышают предельный уровень. Доля кондиционной площади полосы определяется как отношение соответствующей гарантийным показателям площади к общей площади полосы. Однако, поскольку несоответствующие участки по длине и ширине полосы потребителю продукции вырезать невозможно, то некондиционным будет считаться весь металл по длине полосы, где хотя бы одно значение неплоскостности по ширине полосы превышает предельное.

#### **Результаты сравнительного анализа.**

За три дня с неработающей системой селективной подачи СОЖ прокатано 605 рулонов, число которых по каждой позиции сортамента (Ч) приведено в табл.1-8. При обработке фактических данных о неплоскостности полос в группе рулонов по сегментам длины каждой из них определяли каким предельно допустимым отклонением должно быть охарактеризовано 95,4% доли годной продукции, чтобы только в оставшейся части отклонение от плоскостности превышало величину  $\Pi$  (табл.1). В табл.2 приведены аналогичные данные с использованием методики аттестации по длине полосы.

За три дня с работающей системой селективной подачи эмульсии было прокатано 876 рулонов. В табл. 3 – 4 представлены результаты оценок. В табл.1–4 представлены результаты оценок отклонения фактической эпюры распределения вытяжек от равномерного распределения.

Выполнили также сравнение показателей неплоскостности, основанных на отклонении фактической эпюры распределения вытяжек от заданной оператором стана. В табл.5-8 представлены такие результаты, которые получены на основании тех же исходных данных, что использовались для анализа отклонения от равномерного распределения.

На рис.2 в качестве примера представлены сравнительные усредненные (по группам толщины полос) данные о выходе годного и предельных отклонениях плоскостности по группам ширины полос для двух случаев – без селективного охлаждения валков и с работающим СОВ.

Таблица 1. Оценка плоскостности по площади полосы (прокатка без селективного охлаждения валков)

Диапазон толщины, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	84,6	11	10,2	85,9	89	13,5		0	
0,51–0,7	83,8	93	10	81,1	62	13,6		0	
0,71–1,2	63,12	63	13,2	70,8	146	12,9	78,3	41	13,1
1,21–3,5	54,5	38	11,7	66,2	61	12,9		0	

Примечание: Г – доли площади полосы, соответствующей гарантируемым показателям; Ч – число проанализированных рулонов; П – предельное отклонение от плоскостности в IU, которое соответствовало бы 95,4% доли годного по этой же методике оценки

Таблица 2. Оценка плоскостности по длине полосы (прокатка без селективного охлаждения валков)

Диапазон толщину, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	0	11	19,2	4,6	89	22,3		0	
0,51–0,7	5,1	93	18,9	3,1	62	26,6		0	
0,71–1,2	1,3	63	25	1,22	146	28,9	0,7	41	24,5
1,21–3,5	0,48	38	21	1,1	61	30,4		0	

Примечание: см. табл. 1

Таблица 3. Оценка плоскостности по площади полосы (прокатка с селективным охлаждением валков)

Диапазон толщину, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	95	39	6,95	94,7	67	8,5		0	
0,51–0,7	88,6	36	8,33	93,9	119	9	93,1	23	9,15
0,71–1,2	92,1	95	6,1	94,5	294	6,2	88,4	24	10,3
1,21–3,5	89,2	43	5,54	92,8	127	6,5	84,7	9	14,9

Примечание: см. табл. 1

Таблица 4. Оценка плоскостности по длине полосы (прокатка с селективным охлаждением валков. (см. табл. 1).

Диапазон толщину, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	26,3	39	10,5	16,8	67	12,4		0	
0,51–0,7	6,23	36	12,9	18,7	119	14,8	11,3	23	13,74
0,71–1,2	8,2	95	12,2	8,7	294	13,8	2,62	24	19,3
1,21–3,5	9,6	43	11,8	9,3	127	14,53	1,9	9	29,6

Табл. 5 Оценка плоскостности по площади полосы (прокатка без селективного охлаждения валков)

Диапазон толщин, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	95,47	11	6,36	94	89	8,72			
0,51–0,7	90,75	93	7,41	89,1	62	10,3			
0,71–1,2	74,24	63	10	78,1	146	10,55	88,2	41	9,68
1,21–3,5	53,26	38	9,87	64,8	61	11,1			
Примечание: см. табл. 1									

Табл. 6 Оценка плоскостности по длине полосы (прокатка без селективного охлаждения валков)

Диапазон толщин, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	44,2	11	12,1	22,4	89	16,3			
0,51–0,7	21,2	93	13,5	8	62	20,5			
0,71–1,2	2,3	63	19,3	3,3	146	23,5	2	41	21,5
1,21–3,5	0,37	38	17,4	1	61	12,8			
Примечание: см. табл. 1									

Табл. 7 Оценка плоскостности по площади полосы (прокатка с селективным охлаждением валков)

Диапазон толщин, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	97,95	39	4,9	98	67	5,7		0	
0,51–0,7	93,6	36	6,37	97,1	119	7,2	97,1	23	6,72
0,71–1,2	95,55	95	4,7	97,2	294	4,64	91,2	24	9,3
1,21–3,5	92,7	43	4,5	94,6	127	4,96	87	9	13,3
Примечание: см. табл. 1									

Табл. 8 Оценка плоскостности по длине полосы (прокатка с селективным охлаждением валков)

Диапазон толщин, мм	Показатели Г (%), Ч (шт) и П (IU) при ширине полос, мм								
	< 1200			1201–1500			1501–1850		
	Г	Ч	П	Г	Ч	П	Г	Ч	П
0,35–0,5	55,5	39	10,73	48,6	67	11,8		0	
0,51–0,7	29,7	36	12,3	49,8	119	13,5	18	23	14
0,71–1,2	39	95	10,75	34,6	294	11,7	6,55	24	18,1
1,21–3,5	22,2	43	9,9	26,47	127	11,8	16,2	9	27,5
Примечание: см. табл. 1									

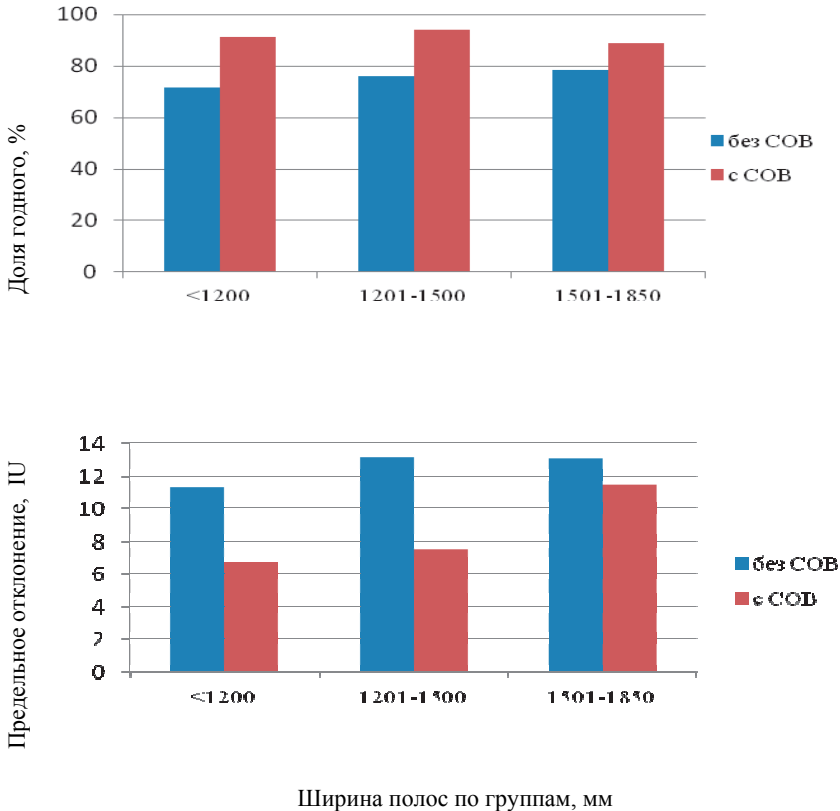


Рис.2. Сравнение показателей работы САПП с равномерной подачей эмульсии (без COB – левые столбики) и с селективным охлаждением валков (правые столбики). Аттестация плоскостности полос по площади.

Выполненный сравнительный анализ показывает, что эксплуатация САПП с работающей подсистемой селективной подачи эмульсии обеспечивает в значительной степени более высокие результаты. Из полученных данных в табл. 1-8 и из гистограмм рис. 2 следует, что в среднем гарантируемые показатели по плоскостности только за счёт работы канала селективного охлаждения рабочих валков могут быть уменьшены на  $\pm 2-6$  IU при аттестации по площади полосы и на  $\pm 10-15$  IU при аттестации по длине полосы. Полученные данные сопоставимы с величинами предельно допустимых отклонений от плоскостности полосы, соответствующими современным требованиям.

Из сравнительных данных таблиц следует, что при гарантировании предельных отклонений плоскостности по площади полосы допуски мо-

гут быть уменьшены примерно в отношении 0,4-0,7 в сравнении со случаем гарантирования показателей по длине полосы.

Установлено, что отношение предельных величин неплоскостности на 95,4% площади прокатываемых полос при работающей системе СПЭ и неработающей СПЭ составляет 0,44–0,7, что говорит о том, что примерно половина допусков по плоскостности прокатываемых полос зависит от работы СПЭ. Из сказанного следует, что канал СПЭ является высокоэффективным и в условиях современного промышленного стана почти вдвое улучшает показатели работы САРП.

Однако эффективность этого канала управления снижается, если не обеспечен необходимый ( $5-15^{\circ}\text{C}$ ) тепловой напор СОЖ (различие температуры СОЖ и рабочих валков). В этой связи одной из важных инновационных функций современной САРП является контроль технологических параметров процесса прокатки, от которых зависит тепловой напор СОЖ и, соответственно, возможность его поддержания в приемлемом, указанном выше диапазоне. К таким параметрам относятся сила прокатки в последней клетке, где функционирует САРП, скорость прокатки, а также расходы СОЖ в клетях, предшествующих последней (для непрерывного стана).

Особо остро стоит задача обеспечения необходимого теплового напора СОЖ для 5-ти клетевых станов, где в последней клетке, как правило, реализуют малые (1-5%) обжатия, что связано с использованием текстурированных (с исходной шероховатостью поверхности  $Ra=3-4$  мкм) валков достаточно большого (как правило, 600 мм) диаметра, а также реализации общепринятой и показавшей наилучшие результаты стратегии управления толщиной полосы в предпоследней клетке (с поддержанием постоянной силы прокатки в последней клетке, что улучшает плоскостность полос). В этом случае при прокатке в последней клетке возникает слабое тепловыделение и разница между температурой СОЖ и валками сводится к минимуму. При этом управление тепловым профилем валков также сводится к минимуму. В связи с этим важно осуществлять измерение и контроль разницы температуры эмульсии и валков. Для контроля теплового напора СОЖ на стане 2030 НЛМК были установлены бесконтактные датчики измерения температуры нижнего рабочего валка со стороны выхода в последней клетке стана, а также температуры полосы на выходе из стана перед стрессометрическим роликом.

При двусторонней схеме охлаждения температура поверхности рабочего валка в установившемся тепловом режиме работы стана за оборот изменяется от температуры в очаге деформации (на выходе из ОД) до температуры охлаждающей эмульсии (на входе). В этом случае пересечение кривой изменения температуры поверхности валка за один оборот с линией среднemasсовой температуры валка проходит приблизительно в точке с угловой координатой  $90^{\circ}$  от нижней точки окружности нижнего рабочего валка со стороны выхода из клетки [1]. В то же время в последней

клетки стана подачу СОЖ производят только со стороны входа, поэтому валки со стороны выхода охлаждаются только на воздухе и температура поверхности валка, соответствующая его среднemasсовой температуре, находится со стороны входа в зоне орошения, где её измерение на поверхности бесконтактным методом невозможно. Поэтому бесконтактный инфракрасный датчик измерения температуры был установлен в конструктивно возможном месте со стороны выхода из валков. Тарировку датчиков производили на поверхности полосы с известной температурой и близкими коэффициентами отражения поверхности. Результаты измерений показали, что температура поверхности рабочих валков на выходе близка к температуре полосы и изменяется в достаточно широком диапазоне вместе с температурой полосы при кратковременных замедлениях стана, из чего следует, что точка на поверхности валка не соответствует местоположению среднemasсовой температуры.

На основании экспериментальных данных об измеренных значениях температуры поверхности валков после вывалки (при известной температуре СОЖ), которые сравнивали с измеренными значениями температуры поверхности, определили поправочный коэффициент. Однако, использование этого поправочного коэффициента к измеренной температуре в установившемся режиме прокатки на рабочей скорости приводил к заниженным значениям температуры валков в паузах (при остановках стана), когда среднemasсовая температура рабочих валков близка к температуре эмульсии. Поэтому адаптировали величину разницы измеренной температуры поверхности валка и температуры СОЖ на входе в клеть (её изменение при прокатке одного рулона не превышает  $10^0\text{C}$ ).

Из рис.3 следует, что тепловой напор СОЖ составляет примерно  $9^0\text{C}$ , что можно считать приемлемым для эффективного регулирования плоскостности полос селективной подачей СОЖ.

Если стан холодной прокатки не оснащён датчиками температуры рабочих валков (датчиками температуры СОЖ оснащены практически все современные станы), то можно воспользоваться установленной нами корреляционной зависимостью между тепловым напором СОЖ и разницей температуры СОЖ на входе в клеть и на выходе (в картере клетки). Для этого случая также разработан эффективный способ управления [2], заключающийся в том, что в процессе прокатки на основании текущих данных о температурах СОЖ на входе и выходе из последней клетки, определяют действительную разность этих температур и сравнивают её с требуемой, а суммарный расход СОЖ в группе клеток, предшествующей последней внутри интервала времени между съёмом данных устанавливают по предложенной зависимости [3].

В работе [4] приведена основная полученная нами математическая зависимость, используемая в алгоритме управления. Она выражает взаимосвязь текущего и заданного расхода СОЖ по зонам в функции отношения фактического и требуемого теплового профилей валка в

соответствующих точках по длине активной образующей валка. В этой зависимости при изменении знака текущих разницы температуры СОЖ и средней температуры рабочего валка управляющие воздействия инвертируются. Это делает адекватным управление плоскостностью в двух случаях, когда эмульсия охлаждает валки и когда нагревает их на стадии разогрева валков [5].

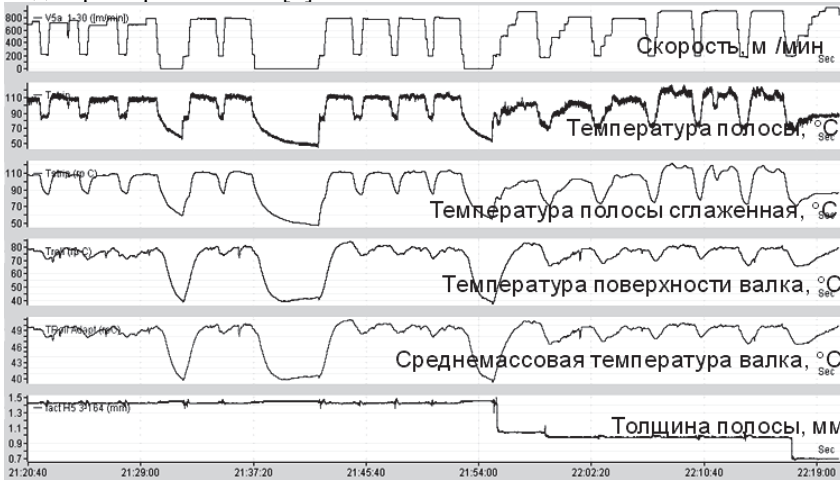


Рис.3. Графики изменения (последовательно сверху вниз): скорости прокатки, температуры полосы непосредственно с датчика, температуры полосы после фильтрации измеренных данных, температуры поверхности нижнего валка 5-й клетки со стороны выхода, адаптированной среднемассовой температуры валка, конечной толщины полосы. Температура эмульсии  $40^{\circ}\text{C}$ .

Разработанный алгоритм и программное обеспечение [6] предусматривает возможность использования не только СОЖ, но и смазочно-нагревающей жидкости (СНЖ), подаваемой на валки непосредственно за пределами ширины полосы для снижения перепада теплового профиля валка на краях полосы, приводящего к резкому изменению степени деформации полосы на краях. Подача пропущенной через нагреватель СНЖ выравнивает тепловой профиль рабочих валков на участках вблизи кромок прокатываемой полосы. В то же время регулирование расхода СНЖ позволяет воздействовать на активную образующую рабочих валков на незначительных по протяженности прикромочных участках и компенсировать на этих участках результирующее влияние двух противоположно действующих факторов – неравномерности теплового профиля валков и их упругого сжатия в контакте с полосой. Для расчета расхода СНЖ, температура которой всегда выше средней температуры валка, использовался вышеописанный подход к случаю разогрева валков после перевалки.

Разработанный алгоритм управления является структурной состав-



ляющей автоматической системы управления плоскостностью полос с одновременным использованием других способов и средств воздействия.

С учётом того, что работа системы селективного охлаждения валков приводит к неравномерности распределения температуры по ширине полосы, которая, соответственно, вносит существенную погрешность в плоскостность готовой продукции, нами разработано и реализовано в действующей системе автоматического регулирования плоскостности полос (см. [7]) новое техническое решение [8]. Решение позволяет корректировать целевые кривые плоскостности полосы с учётом фактических измеренных данных о распределении температуры по её поверхности, тем самым обеспечивая эффект последующей термоправки полос после их полного остывания.

Система также позволяет определять корреляционные связи между селективной подачей эмульсии и воздействием на плоскостность полосы на соответствующих участках по ширине полосы. Это позволяет диагностировать состояние клапанов и форсунок на основе сравнительных данных об этих связях по контролируемым зонам СПЭ.

#### **Выводы.**

На основании численного анализа экспериментальных данных, полученных на современном промышленном стане холодной прокатки, установлено, что система селективной подачи эмульсии при обеспечении её эффективной работы (с тепловым напором СОЖ 5-15<sup>0</sup>С) примерно вдвое улучшает показатели работы САПП.

В разработанном алгоритме управления селективной подачей эмульсии реализован ряд важных новых особенностей:

- инвертирование управляющих воздействий на стадии разогрева валков (когда СОЖ не охлаждает, а разогревает валки);
- новые методы и способы создания стабильных условий, при которых управление плоскостностью прокатываемых полос эффективно (патенты РФ 2190488, 2190489, 2212962, 2212963, 2225272);
- достижение эффекта термоправки полос за счёт коррекции целевых кривых плоскостности полос в зависимости от текущего измеренного температурного поля в полосе.

1. *Гарбер Э. А.* Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов / Э.А.Гарбер, А.А.Гончарский, М.П.Шаравин. – М.: Металлургия, 1991. – 256 с.
2. Пат. 2212963 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетьевом стане / Чернов П.П., Приходько И.Ю., Сафьян А.М., Акишин В.В., Парсенюк Е.А., Долматов А.П., Рубанов В.П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 25.12.2001; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.

3. Пат. 2212962 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетьевом стане / *Чернов П.П., Акишин В.В., Парсенюк Е.А., Скороходов В.Н., Приходько И.Ю., Сафьян А.М., Долматов А.П., Рубанов В.П.*; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 25.12.2001; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.
4. *Приходько И. Ю.* Управление тепловым профилем валков зонной подачей СОЖ / И. Ю. Приходько // Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003. – М.: АО Черметинформация, 2004. – С. 113 – 122.
5. *Приходько И. Ю.* Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии. / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, С. Е. Шагохин // Сталь. – 2006. – №11. – С. 87 – 93.
6. *Приходько И. Ю.* Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станом / И.Ю.Приходько, С.А.Воробей, С.Е.Шагохин // Сталь. – 2005. – №11. – С. 72 – 77.
7. *Приходько И. Ю.* Система автоматического регулирования плоскостности полос и температуры с использованием бесконтактных методов измерения. / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, В. В. Разносилин, А. А. Сергеенко, С. В. Трусило, В. А. Агуреев, А. И. Соболев, Е. А. Парсенюк, Ю. А. Цуканов. // Сталь. – 2009. – №3. – С. 41 – 45.
8. Пат. 2211102 Российская Федерация, В21 В 37/28. Устройство для измерения и регулирования плоскостности полос в процессе прокатки / *Приходько И.Ю., Скороходов В.Н., Чернов П.П., Акишин В.В., Парсенюк Е.А., Сафьян А.М., Долматов А.П.*; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 11.03.2002; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук С.А.Воробьем*

### ***И.Ю.Приходько***

#### **Оцінка фактичної ефективності управління площинністю холоднокатаних смуг при селективній подачі емульсії**

Метою роботи є виявлення показників і порівняльної ефективності управління площинністю смуг при селективній подачі емульсії на сучасному безперервному стані холодної прокатки. Аналіз проводили із застосуванням математичної моделі та формальних підходів до оцінки відповідності площинності смуг заданим параметрам для окремих позицій сортаменту. Встановлено, що на 95,4 % площі прокатуваних смуг відношення граничних величин площинності при працюючій і непрацюючій системі селективної подачі емульсії складає 0,44–0,7. Приблизно половина допусків площинності прокатуваних смуг залежить від роботи системи подачі емульсії, що в умовах сучасного промислового стану є високоефективним засобом поліпшення показників роботи систем автоматичного регулювання площинності.