

Эффективность управления плоскостностью холоднокатаных полос селективной подачей эмульсии

И. Ю. Приходько¹, С. Е. Шатохин²¹ Институт черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск, Украина),² Lechler GmbH (Германия)

Разработаны программное обеспечение и алгоритм управления селективной подачей эмульсии (СПЭ) для температурного регулирования валков станов холодной прокатки. Система СПЭ в составе САРП позволяет вдвое улучшить показатели плоскостности прокатываемых полос.

Ключевые слова: селективное охлаждение валков, математическая модель, эффективность управления, смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ).

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 плоскостности полосы. Интерес представляют сравнительные численные данные эффективности работы САРП с использованием СПЭ и без нее. Во втором случае подача эмульсии осуществляется равномерно, без перераспределения по длине бочки валков.

Такой анализ выполнили для условий пятиклетевого стана холодной прокатки 2030 ОАО НЛМК. Сравнивали два трехдневных периода эксплуатации стана с работающей и неработающей системой СПЭ. Долю соответствия заданным предельным величинам неплоскостности (выраженную в международно принятых единицах *IU*) для отдельных позиций сортамента оценивали с применением двух формальных подходов.

1. **По длине полосы.** Если хотя бы одно значение в серии измерений неплоскостности по ширине полосы превышает предельный уровень, то “выбраковывается” весь соответствующий участок по длине полосы. Доля кондиционной длины определяется как отношение длины участков полосы, где ни одно значение неплоскостности не превышает предельного значения, к общей длине полосы. Данный подход формально соответствует общепринятым гарантиям в отношении плоскостности производимой продукции.

2. **По площади полосы.** “Отбраковываются” только те участки по длине и ширине полосы, где измеренные значения неплоскостности превышают предельный уровень. Доля кондиционной площади полосы определяется как отношение соответствующей гаран-

тийным показателям площади к общей площади полосы. Однако поскольку несоответствующие участки по длине и ширине полосы потребитель продукции вырезать не имеет возможности, 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 всего 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 % годной продукции, чтобы только в оставшейся части отклонение от плоскостности превышало величину П (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. Для сравнения в табл. 5 – 8 приведены данные, основанные на отклонении фактической эпюры распределения вытяжек от заданной оператором стана. Результаты (табл. 5 – 8) 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.

Выполненный сравнительный анализ показывает, что эксплуатация САРП с работающей подсистемой селективной подачи эмульсии обеспечивает значительно лучшие качественные показатели. Из полученных данных (табл. 1 – 8) и из гистограмм (рис. 2) следует, что в среднем гарантируемые показатели по плоскостности только за счет 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

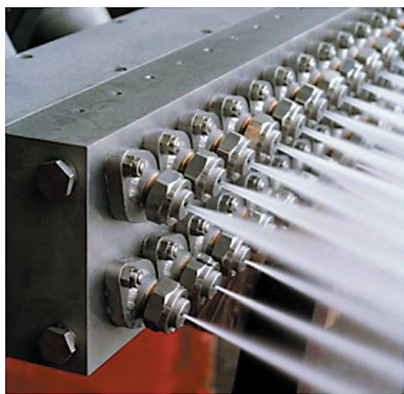


Рис. 1. Коллектор селективной подачи эмульсии фирмы “Лехлер”

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 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	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 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	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)

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	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

Примечание. См. табл. 1

допустимых отклонений от плоскостности полосы, соответствующими современным требованиям. Из сравнения данных таблиц следует, что при гарантировании предельных отклонений плоскостности по площади полосы допуски (П) могут 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 – 0,71, 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 °С) тепловой напор СОЖ (различие температуры СОЖ и рабочих валков).

В связи с этим 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 указанном диапазоне. К таким параметрам относятся сила прокатки в последней клети, где функционирует САРП, скорость прокатки, а также расходы СОЖ в клетях, предшествующих последней (для непрерывного стана).

Особо остро задача обеспечения необходимого теплового напора СОЖ стоит для пятиклетевых станов, где в последней клети, как правило, реализуют малые

Таблица 5. 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	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.

Таблица 6. Оценка плоскостности по длине 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	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.

Таблица 7. Оценка плоскостности по площади полосы (прокатка с селективным охлаждением 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	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.

Таблица 8. Оценка плоскостности по длине полосы (прокатка с селективным охлаждением 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	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.

(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 с общепринятой и показавшей наилучшие результаты стратегией управления конечной толщиной полосы в предпоследней клети с поддержанием постоянной силы прокатки в последней клети (что улучшает плоскостность полос). Это приводит к тому, что при прокатке в последней клети возникает слабое тепловыделение и разница между температурой СОЖ и валков 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 ОАО НЛМК были установлены бесконтактные датчи-

ки измерения температуры нижнего рабочего валка со стороны выхода в последней клети 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 один 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 средней температуры валка проходит приблизительно в точке с угловой координатой 90° от нижней точки окружности нижнего рабочего валка со стороны выхода из клети [1]. В то же время в последней клети стана подачу СОЖ проводят только со стороны входа, поэтому валки со стороны выхода охлаждаются

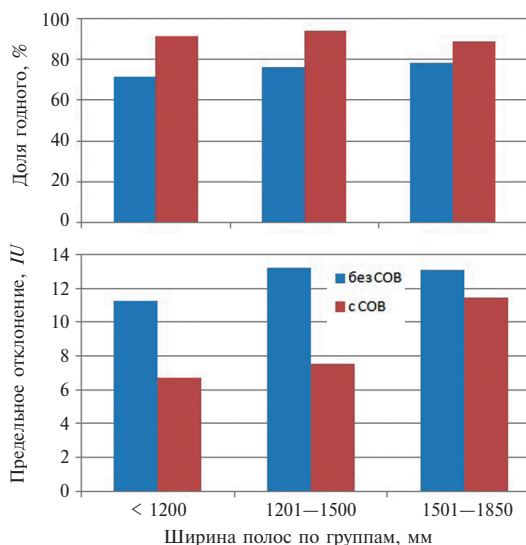


Рис. 2. Сравнение показателей работы САРП с равномерной подачей эмульсии (без СОВ) и с селективным охлаждением валков (аттестация плоскостности полос по площади)

ся только на воздухе, и температура поверхности валка, соответствующая его среднемассовой температуре, наблюдается со стороны входа в зоне орошения, где ее 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 проводили 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.

На основании экспериментальных данных об измеренных значениях температуры поверхности валков после вывалки (при известной температуре СОЖ), которые сравнивали с измеренными значениями температуры поверхности валков, определили поправочный коэффициент. Однако использование этого поправочного коэффициента к измеренной температуре в установившемся режиме прокатки на рабочей скорости приводило к заниженным значениям температуры валков в паузах (при остановках стана), когда среднемассовая температура рабочих валков близка к температуре эмульсии. Поэтому адаптировали разность измеренной температуры поверхности валка и температуры СОЖ на входе в клеть (ее изменение при прокатке одного рулона не превышает 1 °С). Из рис. 3 следует, что тепловой напор СОЖ составляет примерно 9 °С, что можно считать приемлемым для эффективного регулирования плоскостности полос селективной подачей СОЖ.

Если стан холодной прокатки не оснащен датчиками температуры рабочих валков (датчиками температуры СОЖ оснащены практически все современные станы), то можно воспользоваться установленной

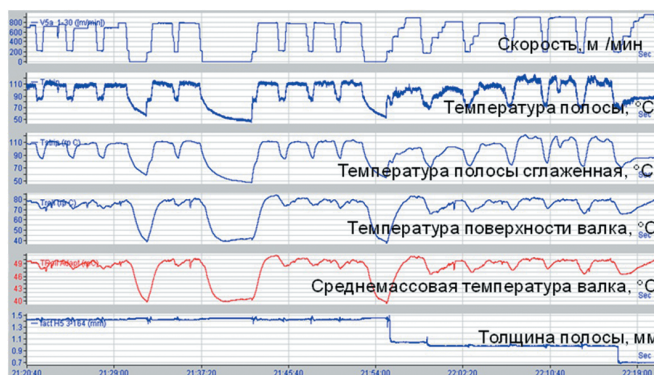


Рис. 3. Графики изменения (сверху вниз): скорости прокатки, температуры полосы непосредственно с датчика, температуры полосы после фильтрации измеренных данных, температуры поверхности нижнего валка 5-й клетки со стороны выхода, адаптированной среднемассовой температуры валка, конечной толщины полосы (температура эмульсии 40 °С)

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 ее с заданной, а суммарный расход СОЖ в группе клеток, предшествующей последней, внутри интервала времени между съемом данных устанавливают по предложенной зависимости [3].

В работе [4] приведена основная математическая зависимость, используемая в алгоритме управления. Она выражает взаимосвязь текущего и заданного расхода СОЖ по зонам в функции отношения фактического и требуемого тепловых профилей валка в соответствующих точках по длине активной образующей валка. В этой зависимости при изменении знака текущей 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].

Разработанные алгоритм и программное обеспечение [6] предусматривают 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 кромках полосы, приводящего к резкому изменению степени деформации полосы на кромках. 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, использовали вышеописанный подход к случаю разогрева валков после перевалки. Разработанный алгоритм управления является структурной составляющей автоматической системы управления плоскостностью полос с одновременным использованием других способов и средств воздействия.

С учетом 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 учетом фактических измеренных данных о распределении температуры по ее 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.

Заключение

На основании численного анализа экспериментальных данных, полученных на современном промышленном стане холодной прокатки, установлено, что система селективной подачи эмульсии при обеспечении ее эффективной работы (с тепловым напором СОЖ 5 – 15 °С) примерно вдвое улучшает показатели работы САРП. В разработанном алгоритме управления селективной подачей эмульсии реализован ряд новых важных 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, 2190498, 2212962, 2212963, 2225272);

достижение эффекта термоправки полос путем коррекции целевых кривых плоскостности полос в зависимости от текущего измеренного температурного поля в полосе.

Библиографический список

1. Гарбер Э. А., Гончарский А. А., Шаравин М. П. Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов. — М. : Металлургия, 1991. — 256 с.
2. Пат. 2212963 РФ, В 21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетевом стане / Чернов П. П., Приходько И. Ю., Сафьян А. М. и др. ; заявитель и патентообладатель ОАО НЛМК ; заявл. 25.12.2001 ; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.
3. Пат. 2212962 РФ, В 21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетевом стане / Чернов П. П., Акишин В. В., Парсенюк Е. А. и др. ; 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 / Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003. — М. : АО Черметинформация, 2004. С. 113 – 122.
5. Приходько И. Ю., Чернов П. П., Шатохин С. Е. Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии // Сталь. 2006. № 11. С. 87 – 93.
6. Приходько И. Ю., Воробей С. А., Шатохин С. Е. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов // Сталь. 2005. № 11. С. 71 – 77.
7. Приходько И. Ю., Чернов П. П., Разносилин В. В. и др. Система автоматического регулирования плоскостности полос и температуры с использованием бесконтактных методов измерения // Сталь. 2009. № 3. С. 41 – 45.
8. Пат. 2211102 РФ, В 21 В 37/28. Устройство для измерения и регулирования плоскостности полос в процессе прокатки / Приходько И. Ю., Скороходов В. Н., Чернов П. П. и др. ; заявитель и патентообладатель ОАО НЛМК ; заявл. 11.03.2002 ; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24.