

Приходько И.Ю., Воробей С.А. (ИЧМ),
Чернов П.П., Поляков М.Ю., Мазур С.И., Савочкин А.Г. (НЛМК)

Исследование эффективности работы системы охлаждения валков ШСГП 2000 НЛМК

В последние годы в связи с возрастающими требованиями к качеству горячекатаных полос, повышением интенсивности производства, усложнением сортамента, появлением новых материалов и конструкций валков все большее внимание уделяется оптимизации температурных режимов их эксплуатации. Увеличение количества воды для охлаждения валков, как правило, не позволяет коренным образом повысить эффективность работы системы. Поэтому особое внимание уделяется разработке эффективных способов отвода тепла, в частности, организации эффективной подачи охладителя на валки, повышению давления в коллекторах, снижению и стабилизации температуры воды. Возрождаются на новом техническом уровне системы подачи технологической смазки на валки и подстуживания поверхности полосы на входе в очаг деформации (так называемая система антишелушения “Anti-Peeling”).

При выборе варианта модернизации системы охлаждения валков на действующих станах важно определить наиболее эффективные технические решения, учитывающие сортament прокатываемых полос, технологические режимы прокатки и параметры основного оборудования стана. Важными вопросами при этом являются определение рационального распределения охладителя по клетям чистой группы, по зонам окружности валков, по длине бочки валков.

Чистовую группу клетей непрерывного широкополосного стана (НШС) горячей прокатки 2000 ОАО «НЛМК» планируется оснастить современной системой охлаждения валков. Вместе с тем, проведение такой реконструкции требует значительных финансовых затрат и времени. В связи с этим стояла задача провести обследование и выполнить анализ состояния и работы существующей системы охлаждения рабочих валков, на основании которого подготовить предложения по повышению ее эффективности при минимальных затратах.

С целью обследования существующей системы охлаждения валков чистой группы НШС 2000 применена оригинальная методика, включающая получение и анализ следов воздействия форсунок на поверхности рабочих валков^{*)}. Для проверки характера воздействия струй, истекающих из форсунок охлаждения, рабочие валки были обёрнуты обычной упаковочной ламинированной бумагой, повернутой так, что светло-коричневая бумажная поверхность была снаружи, а синяя пластиковая поверхность касалась валка. При попадании охлаждающей жидкости на светло-коричневую сторону, бумажная поверхность разрушалась, обнажая синюю пластиковую подкладку в областях воздействия струй.

После завалки валков в клетки, приведения в рабочее положение подвижных коллекторов, отсекаелей воды и установки валков в рабочее положение подали воду во все коллекторы охлаждения. Интервал времени от момента включения коллекторов до момента их отключения подбирали в ходе предварительных экспериментов, учитывая инерционность заполнения системы охлаждения и, следовательно, время выхода на рабочее давление в коллекторах. Оптимальный интервал времени зависит также от расстояния между форсунками и охлаждаемой поверхностью валков, прочности наружного слоя бумаги. Задачей предварительных экспериментов было определение минимально достаточного времени, при котором давление в форсунках выходит на рабочий уровень, а на поверхности рабочих валков происходит такое разрушение наружного слоя бумаги, которое позволяет зафиксировать четкие следы работы форсунок. Очевидно, что недостаточное или чрезмерное время воздействия струй не позволит получить четкую картину, требуемую для качественного анализа работы

^{*)} Аудит работы прокатных станов / Г. Болтен, Р. Дэвис, Д. Эдвардс, И. Приходько, Г. Волэс // В кн.: "Труды пятого конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003». – М.: АО Черметинформация. – 2004. – С. 155 – 165.

форсунок охлаждения.

В результате проведения предварительных экспериментов было установлено, что при выдержке, обеспечивающей достижение рабочего давления в системе, следы на бумаге оказывались несколько размытыми и не давали четкого представления о конфигурации следов воздействия отдельных форсунок. Учитывая, что при небольшом отклонении давления воды в области рабочих значений изменение углов раскрытия факела форсунки несущественно, было уменьшено время от включения до выключения насосов подачи воды. При этом общий характер распределения охладителя по поверхности валка изменяется несущественно. Завышенное время выдержки приводит к интенсивному размоканию бумаги, её смыванию стекающим с валков потоком воды и искажению реальной картины охлаждения. На рис. 1 представлены фотографии валков всех клеток чистовой группы со стороны входа и выхода после подачи на них охлаждающей воды и вывалки из клеток. Для оценки суммарных зон (площадей орошения) одновременно со стороны входа и выхода по длине бочки фотографировали следы работы форсунок на развернутой бумаге после снятия её с верхнего и нижнего рабочего валка каждой клетки. На рис. 2 в качестве примера приведены фотографии следов работы форсунок на развернутой бумаге после снятия её с рабочих валков 10-й клетки.

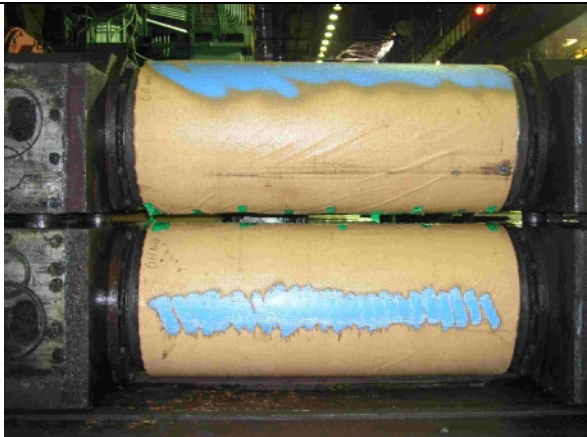
Проведены измерения расположения коллекторов охлаждения в каждой клетке чистовой группы. Углы раскрытия факелов и места охлаждения валков определяли на основании измерений и анализа топографии охлаждения (следов работы форсунок) на развернутой бумаге с учетом диаметра валков. В результате таких измерений и анализа были воспроизведены схемы подачи охладителя в каждой клетке чистовой группы. Схемы охлаждения валков приведены на рис. 3.

Анализ полученных результатов позволил сделать ряд выводов. Во всех клетках чистовой группы применяются однорядные коллектора, при этом суммарное проходное сечение форсунок близко к оптимальному. В большинстве клеток подача охладителя по длине бочки валков близка к удовлетворительной для условий применения однорядных коллекторов. Однако вследствие применения однорядных коллекторов на центральных участках по длине бочки, где шаг форсунок минимальный, наблюдается пересечение факелов со смежных форсунок, что снижает эффективность охлаждения. В некоторых клетках наблюдается неравномерная подача охладителя по длине бочки валка. Как правило, это обусловлено недостаточной точностью изготовления коллекторов, а именно ориентации посадочных мест крепления форсунок. В наибольшей степени это проявляется при больших расстояниях от коллекторов до валков, например, в клетках 9, 10, 11 (верхний валок, сторона входа). Также имеет место неравномерность подачи охладителя из неподвижного коллектора на нижний валок со стороны выхода 7-й клетки.

Зоны охлаждения верхних рабочих валков клеток 6, 7 и 12 со стороны входа располагаются очень высоко (вблизи линии контакта рабочих и опорных валков). Часть воды, возможно, попадает на опорные валки и используется недостаточно эффективно. В клетках со стороны выхода из рабочих валков подача воды осуществляется на значительном расстоянии от выхода металла из очага деформации, что особенно ухудшает условия отвода тепла в первых клетках чистовой группы (клетки 6-8). В период проведения исследований наихудшие условия охлаждения валков наблюдаются в 9-й клетке (верхний валок со стороны входа). В клетках 6, 9, 12 на верхние валки со стороны входа (рис. 3) подача охладителя происходит под большим углом к нормали, то есть основная часть охладителя направлена по касательной к охлаждаемой поверхности, что снижает эффективность охлаждения.

С целью определения существующих температурных режимов эксплуатации рабочих валков были проведены специальные исследования. Проводили измерения температуры валков сразу после их вывалки из клеток. Одновременно фиксировали информацию о технологических параметрах прокатки последних перед перевалкой полос – температуру раската и конца прокатки, скорости прокатки по клетям, усилия прокатки, машинное время и время пауз. Фиксировали расход охлаждающей воды по клетям, её температуру и давление после насосов.

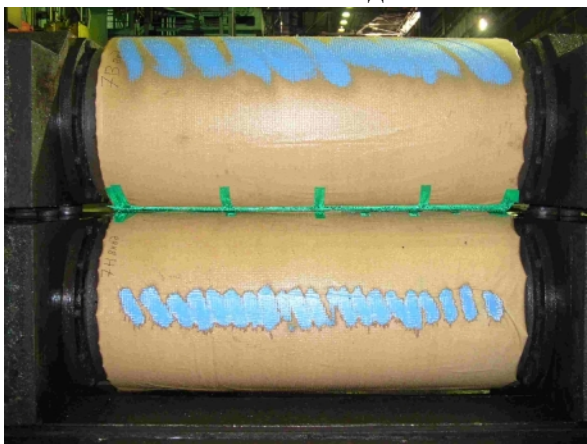
Клеть 6 вход



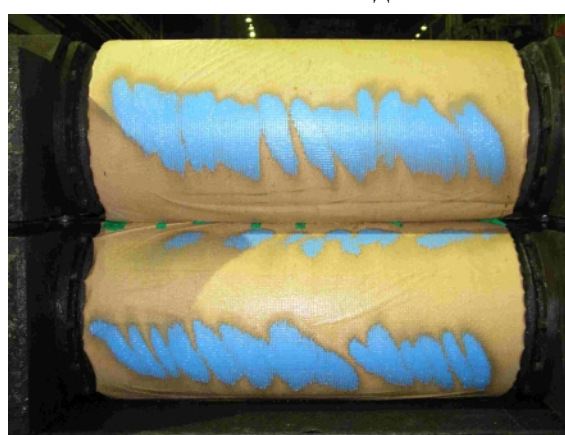
Клеть 6 выход



Клеть 7 вход



Клеть 7 выход



Клеть 8 вход



Клеть 8 выход



Клеть 9 вход



Клеть 9 выход



Клеть 10 вход



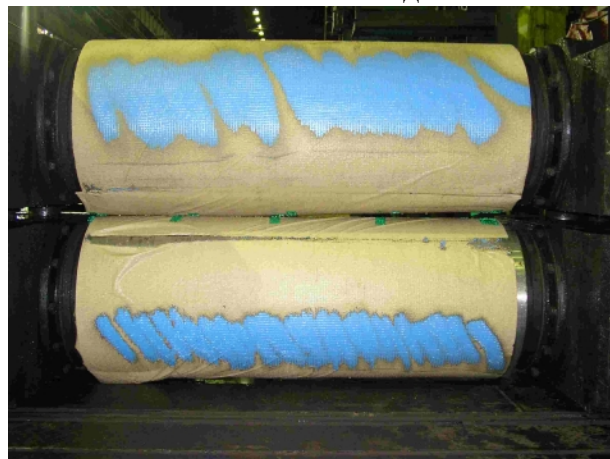
Клеть 10 выход



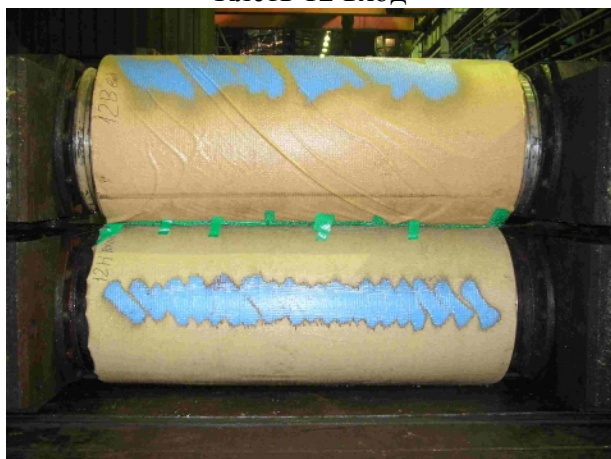
Клеть 11 вход



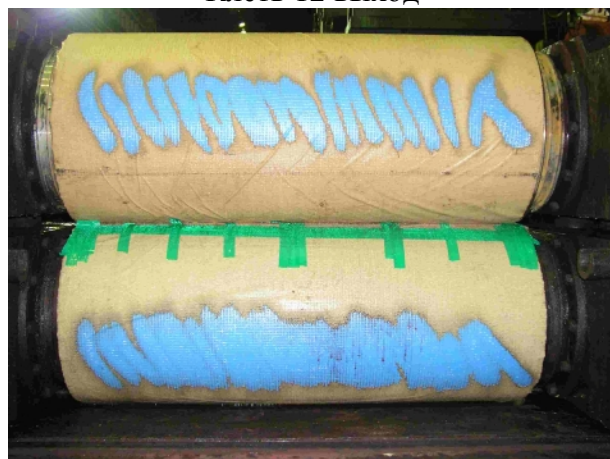
Клеть 11 выход



Клеть 12 вход



Клеть 12 выход



а)

б)

Рис. 1 Следы работы форсунок охлаждения рабочих валков в клетях чистой группы со стороны входа (а) и выхода (б) из валков

Для уточнения рационального времени между вывалкой и замерами температуры валков провели исследование в клетях № 7. Температуру верхнего и нижнего валков измеряли сразу после вывалки из клетки, через 15; 25 и 35 мин после вывалки. Измерения проводили через каждые 100 мм по длине бочки валков на участке прокатки полосы. Результаты замеров приведены на Рис. 4.

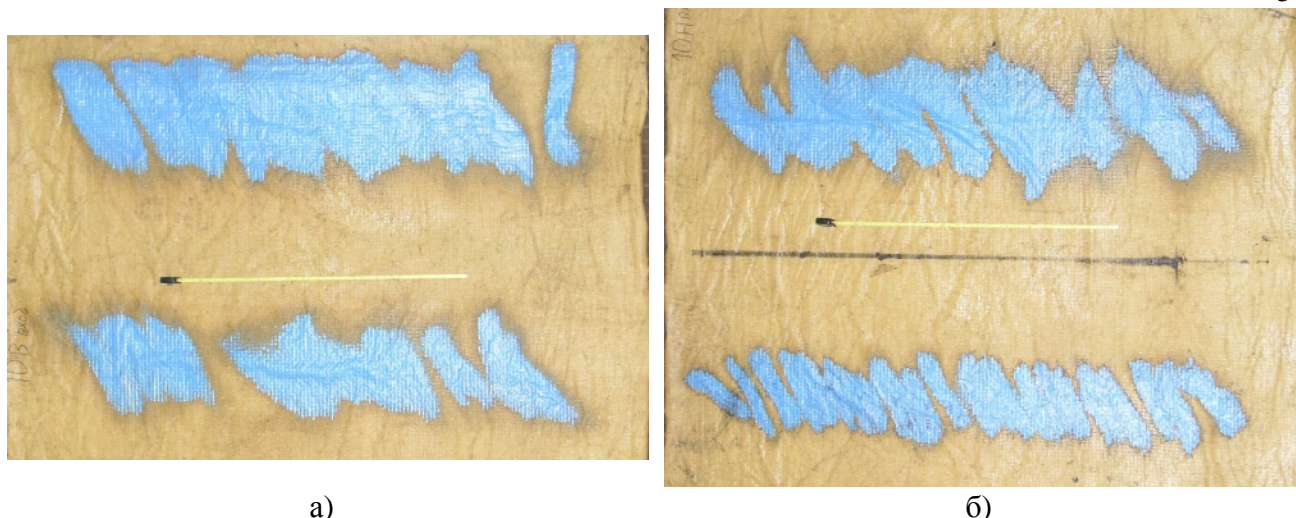


Рис. 2 Следы работы форсунок охлаждения рабочих валков в 10-й клетки чистовой группы на развернутой бумаге: а) верхний валок; б) нижний валок. Слева сторона привода.

Полученные данные показывают, что измерения температуры валков с целью уточнения влияния температурного режима на тепловой профиль валков и поперечный профиль полосы рационально производить в интервалы времени 10-20 минут после вывалки, когда общие закономерности распределения температуры по радиусу валка относительно стабилизировались, но в то же время существенного влияния тепловых потоков в осевом направлении еще нет. На участках валка, соответствующих кромкам прокатываемых полос, в течение всего зафиксированного времени наблюдается рост температуры, однако уже на расстоянии 100 мм ближе к центру валка это изменение несущественно. В связи с этим для снижения влияния времени измерения температуры валков различных клеток на тепловой профиль валков температуру валков измеряли в пределах ширины полосы на расстоянии 100 мм от каждой кромки.

Необходимость паузы перед замерами температуры валков объясняется следующими соображениями. После прокатки последней полосы некоторое время продолжается охлаждение валков за счет инерционности системы охлаждения. Если происходит охлаждение вращающихся валков, то это приводит к подстуживанию их поверхности. Если происходит охлаждение валков без их вращения, то это приводит к неравномерному температурному полю по их поверхности и длине (в зависимости от особенностей системы охлаждения – расположения коллекторов и подвода к ним воды, различной эффективности охлаждения валков со стороны входа и выхода и пр.). В любом из этих вариантов необходимо некоторое время для стабилизации температурного поля валка.

Исследования температуры валков проводили после прокатки полос различного сортамента. Измерения показали, что после прокатки полос исследованного сортамента температура рабочих валков в центральной части изменяется от 53 до 85 °С на верхних валках и от 56 до 97 °С на нижних валках. Наибольшая температура валков наблюдалась в клетях № 6 и 7. Затем (в порядке убывания): клетки № 8 и 9, № 11, 10, 12 (Рис. 5,б).

На температуру валков оказывают влияние следующие основные технологические параметры: длина дуги контакта валка с полосой, среднее удельное давление, температура полосы, скорость вращения валка, температура охладителя, машинное время и время пауз.

Влияние технологических параметров прокатки в наибольшей степени объединяет такой показатель, как погонное усилие прокатки. На Рис. 6 представлены данные о тесноте связи между погонной силой прокатки и температурой валков.

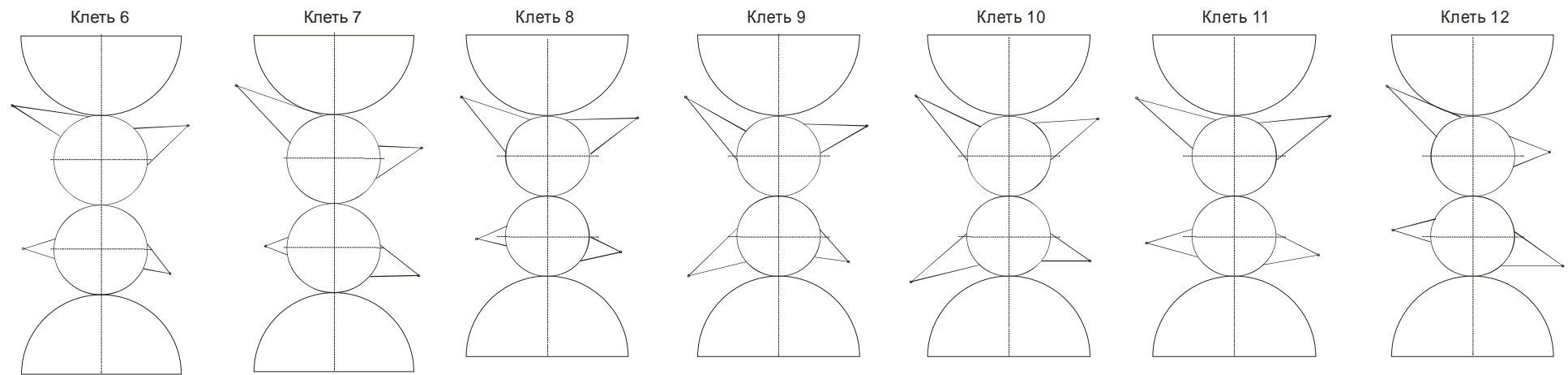


Рис. 3 Схемы подачи воды на рабочие валки клеток чистовой группы в масштабе

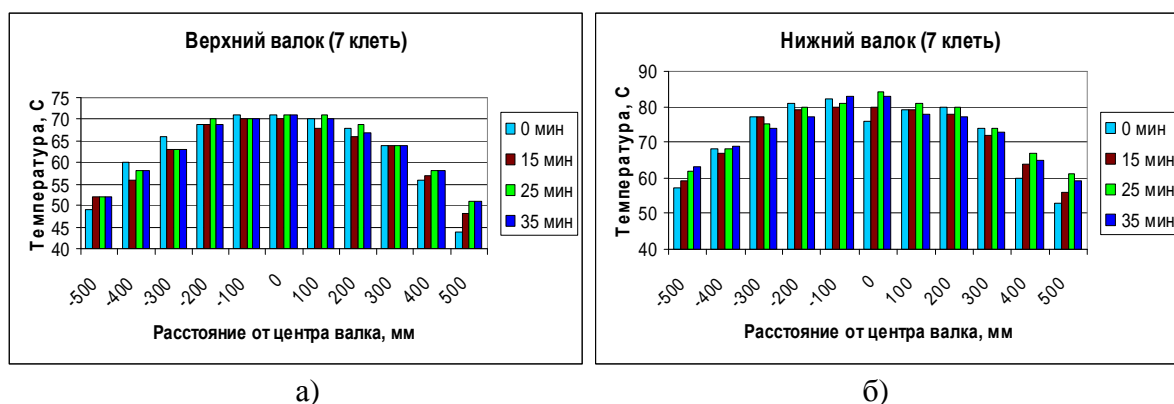


Рис. 4 Изменения температуры в средней части бочки валков в пределах ширины прокатанной полосы во времени начиная с момента вывалки

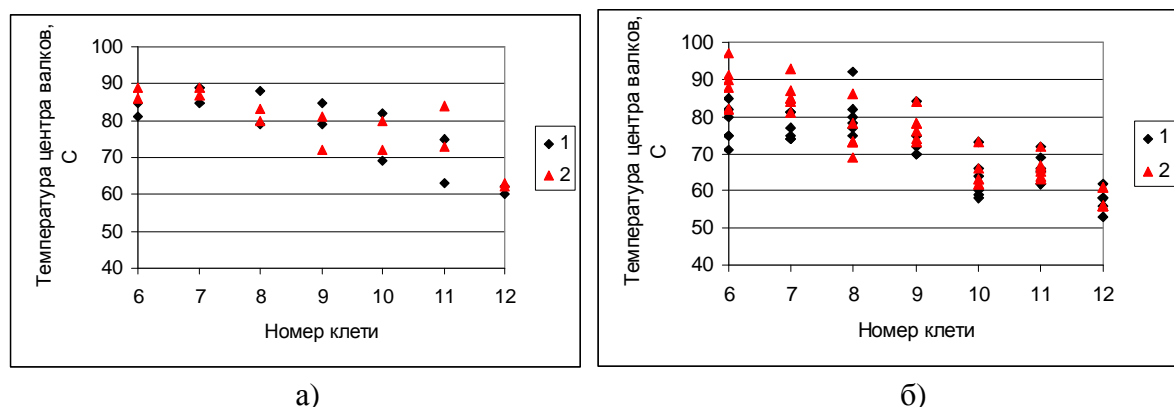


Рис. 5 Измеренные значения температуры рабочих валков в клетях чистой группы в декабре 2004 г. (а) и в феврале 2005 г. (б) после прокатки полос близкого сортамента. Обозначения: 1- верхний валок, 2 – нижний.

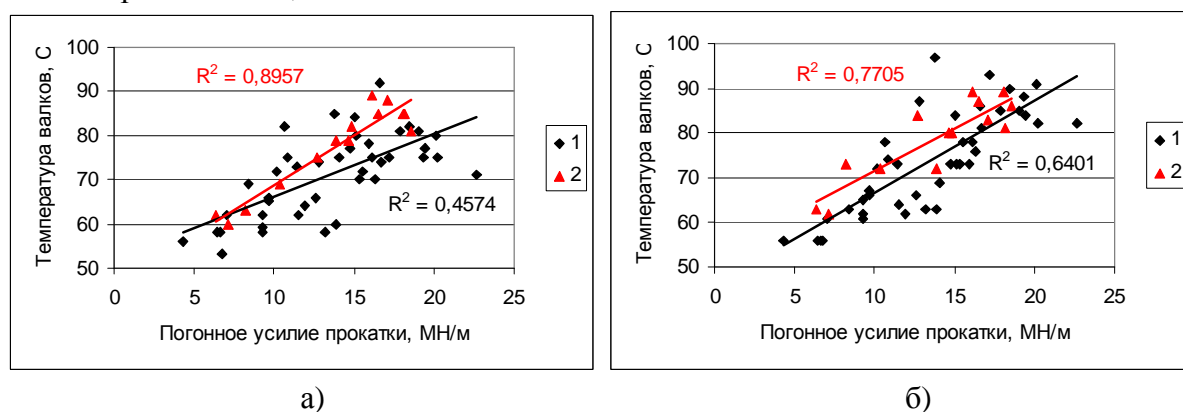


Рис. 6 Зависимость температуры верхних (а) и нижних (б) валков от погонной силы прокатки. Обозначения: 1- данные февраля 2005 г., 2 – данные декабря 2004 г

Эффективность работы системы охлаждения валков в каждой клетке приблизительно можно оценить коэффициентом эффективности $K_{\text{э}}$ ^{*}. Чем больше значение коэффициента $K_{\text{э}}$, тем выше эффективность охлаждения данного валка, которая определяется состоянием подводящих трубопроводов, фильтров и форсунок, оптимальностью количества форсунок, правильностью выбора их типа, точностью ориентации по отношению к валку и схемой подачи воды на поверхность валка. На рис. 7 приведены рассчитанные значения этого коэффициента.

^{*} Обоснование использования данного коэффициента приведено в статье «Методология научно-технического аудита системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки» в сборнике трудов 6-го конгресса прокатчиков.

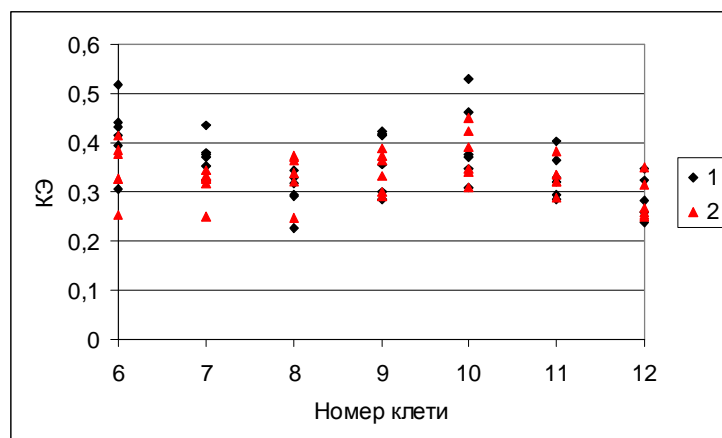


Рис. 7 Значения коэффициента эффективности охлаждения валков по клетям чистовой группы. Обозначения: 1- верхний валок, 2 – нижний.

Средние значения коэффициента эффективности охлаждения валков большинства клеток близки и находятся в пределах 0,3-0,4, однако для верхних валков клеток № 6 и 10 они несколько выше – до 0,45. В клетки № 6 это может быть связано с влиянием подстуживания поверхности раскатов в гидросбиве. В клетки № 10, очевидно, охлаждение центрального участка валков организовано несколько лучше по сравнению с другими клетям.

Таким образом, выполненные исследования показали следующее. Температура рабочих валков в центральной части изменяется от 53 до 85 °С на верхних валках и от 56 до 97 °С на нижних валках. Наибольшая температура валков наблюдалась в клетях № 6 и 7. Затем (в порядке убывания): клетки № 8 и 9, № 11, 10, 12. Температура валков на участках, соответствующих прокатке прикромочных участков полос различается по длине бочки от 0 до 8-10 °С. Наибольшая разница температур верхних валков наблюдается в клетях № 6, 10, 11 и 12, а нижних – в клетях № 9, 10 и 12. При этом более высокая температура валков наблюдается в различных случаях как с приводной стороны, так и со стороны обслуживания.

Зафиксированные значения расхода воды по клетям приведены на рис. 8,а. На рис. 8,б приведены расчетные значения давления воды в форсунках. Расчеты выполнены при следующих допущениях: напорно-расходная характеристика форсунок соответствует номинальной (7 м³/ч при давлении 5 атм.), давление воды во всех коллекторах охлаждения верхнего и нижнего валка данной клетки одинаково.

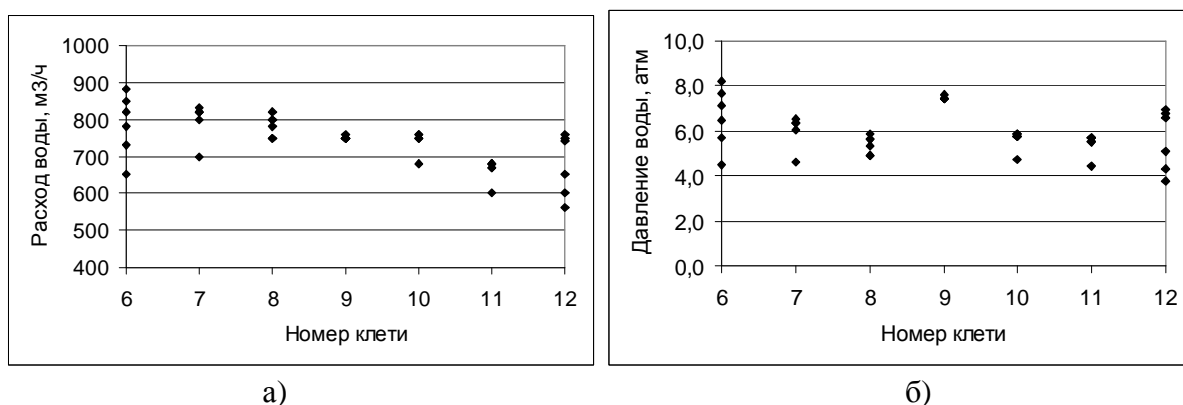


Рис. 8 Расход (а) и расчетное давление воды (б) системы охлаждения рабочих валков.

Исходя из расхода воды и типа коллекторов рассчитали погонный расход воды на охлаждение валков в их центральной зоне, а также плотность орошения с учетом определенных размеров зон активного охлаждения (рис. 9).

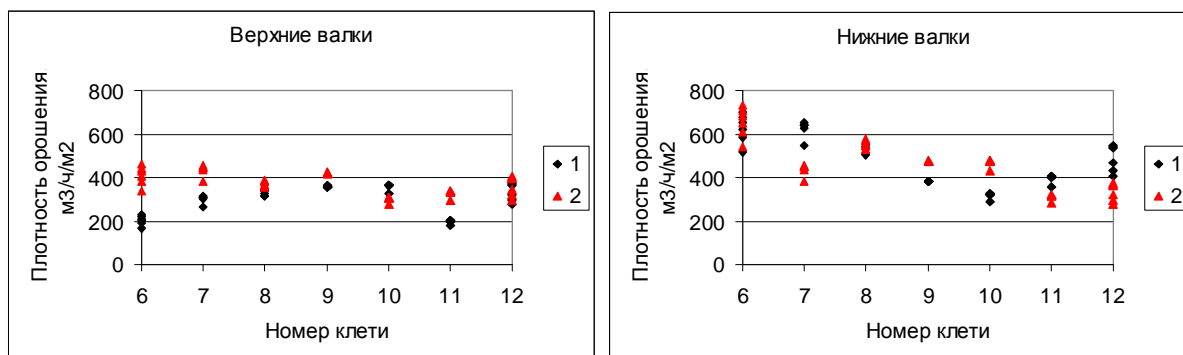


Рис. 9 Плотность орошения валков в центральной зоне. Обозначения: 1 – сторона входа, 2 – сторона выхода.

Выполненный анализ показал, что при прокатке полос различных типоразмеров наибольшие изменения расхода воды производится в клетях № 6 и 12. Расчетное давление воды в основном находится в пределах 5 – 6,5 атм., что можно считать удовлетворительным. Погонный расход воды в центральной части нижних валков выше, чем верхних в среднем на 8 %, что является рациональным. Плотность орошения верхних валков близка к рациональной – 200-400 м³/ч/м². Плотность орошения нижних валков высокая (за исключением клетки № 11, где установлен двухрядный коллектор). Излишне высокая плотность орошения приводит к снижению эффективности использования охлаждающей воды.

Моделирование условий охлаждения валков

С целью определения возможности применения математических моделей для разработки и оценки эффективности решений по модернизации системы охлаждения валков выполнены расчеты температурного режима валков. Расчеты выполняли с использованием двух компьютерных программ TRollCS © и Troll HSM ©^{*)}.

Расчеты температуры полос и усилий прокатки выполняли для средней части полос. Ошибка в расчете усилия прокатки в большинстве случаев не превышает 8-15%, температуры конца прокатки 10 – 15°C. Это позволяет использовать расчетные значения температуры полос в межклетевых промежутках для моделирования температурного режима валков.

В качестве примера на рис. 10 и рис. 11 показаны результаты расчета температуры верхнего валка клетки № 7 и нижнего валка клетки № 7 после прокатки полос размером 1,8×935мм.

На Рис. 12 приведены данные о точности прогнозирования температуры рабочих валков.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования разработанной математической модели для оценки эффективности различных вариантов модернизации системы охлаждения рабочих валков чистовой группы клеток НШС 2000.

Провели оценку влияния конструкции существующих коллекторов на распределение охладителя по длине бочки валков с помощью ранее разработанных алгоритмов и программных средств. В расчетах учитывали реальное расположение коллекторов в клетях, количество и характеристики форсунок, а также шаг по длине коллекторов. В качестве примера на рис. 13 показана развертка поверхности валка с зонами охлаждения со стороны входа и выхода, а также суммарный погонный расход охладителя по длине бочки валка.

^{*)} Краткое описание возможностей программ приведено в статье «Методология научно-технического аудита системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки» в сборнике трудов 6-го конгресса прокатчиков.

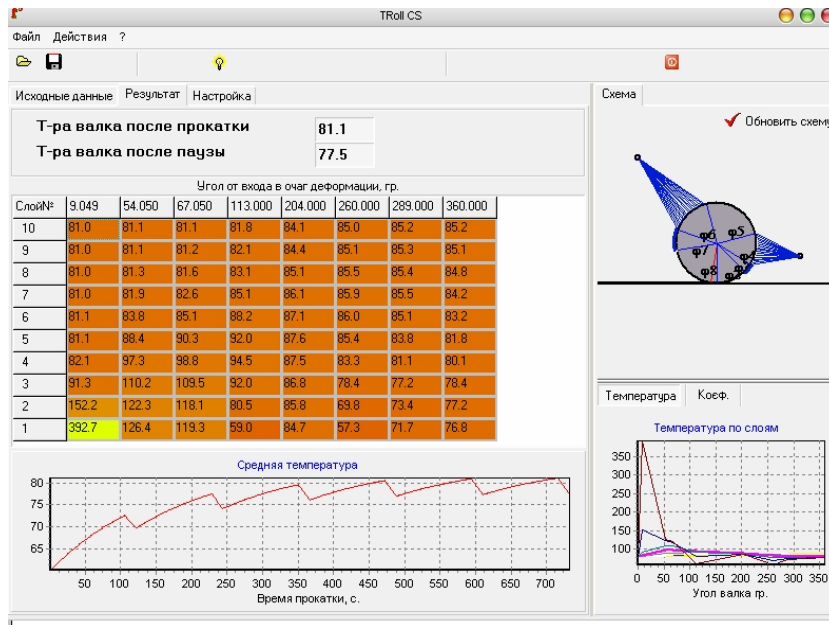


Рис. 10 Температура верхнего вала клетки №7 при существующей схеме охлаждения.

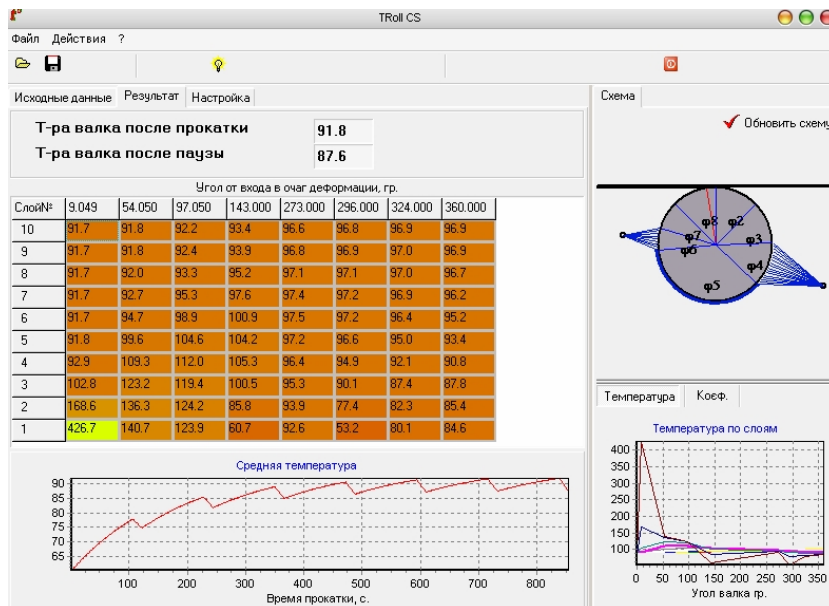


Рис. 11 Температура нижнего вала клетки № 7 при существующей схеме охлаждения

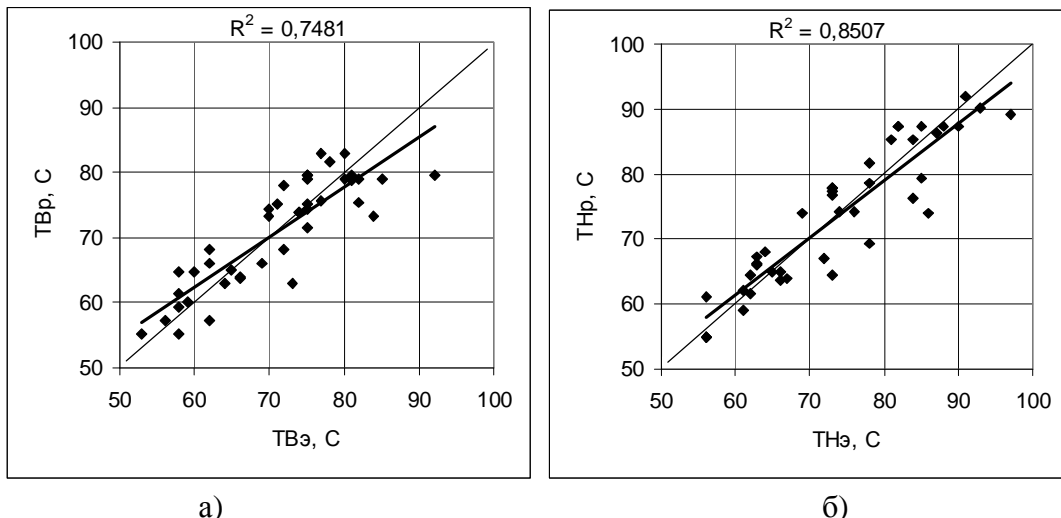


Рис. 12 Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры верхних (а) и нижних (б) валков в чистой группе клеток НПС 2000 ОАО «НЛМК»

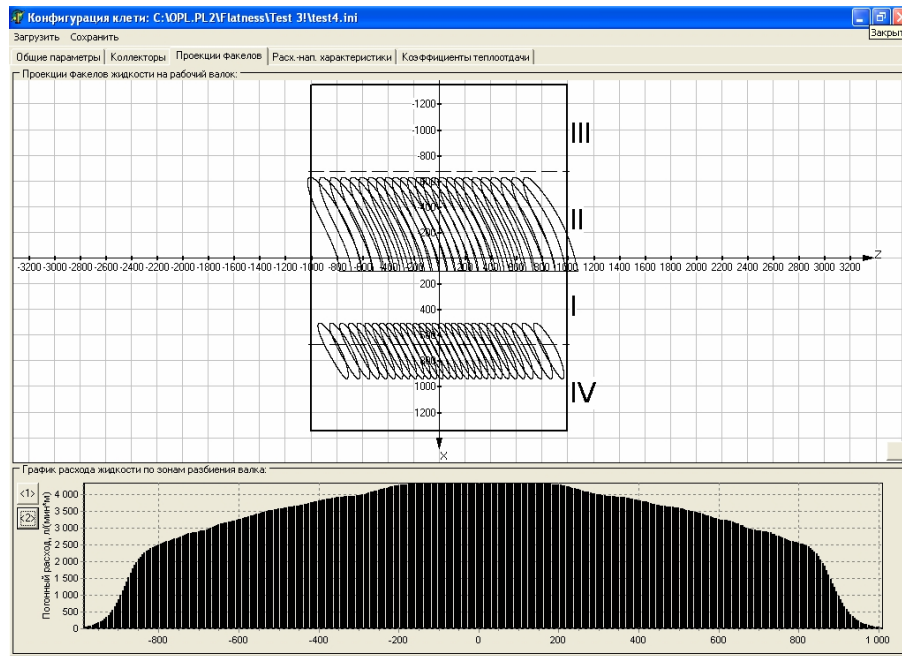


Рис. 13 Развертка поверхности валка с зонами охлаждения со стороны входа и выхода, а также суммарный погонный расход охладителя по длине бочки валка

Следует отметить, что полученные результаты не учитывают отклонений, связанных с неточным изготовлением коллекторов и их ориентации по отношению к валкам. Тем не менее, полученные результаты показывают, что наблюдается существенное перекрытие факелов смежных форсунок, что снижает эффективность охлаждения валка. Особенно сильно это проявляется в центральной части коллекторов, где форсунки расположены на малом расстоянии друг от друга (50 мм). Перекрытие факелов форсунок достигает 80% площади орошения. Рассчитанная схема охлаждения показывает, что часть воды, подаваемой на верхний валок со стороны входа, попадает на опорный валок вследствие неоптимальной ориентации коллектора по отношению к рабочему валку.

Разработка рекомендаций по улучшению работы системы охлаждения рабочих валков

Анализ результатов проведенных исследований показал, что для повышения эффективности охлаждения рабочих валков чистовой группы клеток НШС 2000 при относительно небольших затратах наиболее рациональным решением является замена существующих коллекторов на двухрядные. При этом повышение эффективности обеспечивается за счет устранения пересечения факелов смежных форсунок и увеличения угловых (окружных) размеров зон активного охлаждения. Решение этих задач обеспечивается применением многорядных, в частности, двухрядных коллекторов.

При выборе параметров коллекторов необходимо одновременно решать две задачи – увеличение зон активного охлаждения и повышение равномерности охлаждения по длине бочки валков. Исходя из этих соображений, с использованием комплекса математических моделей, были рассчитаны рациональные параметры коллекторов всех клеток чистовой группы. Практически для каждой клетки, для каждого валка рациональные параметры коллекторов различны. Это связано с различным расположением коллекторов, отличиями в конструкциях клеток и размерах валков, а также схемой распределения подачи воды по клеткам.

Выбор параметров коллекторов в значительной степени определяется типом и характеристикой применяемых форсунок. В связи с этим, расчеты были выполнены для трех вариантов форсунок:

1. применяемые в настоящее время форсунки с размером проходного сечения 8×16 мм (экспериментально установленный средний угол раскрытия факела 45°, номинальный расход воды 116,67 л/мин при давлении 5 атм.) и 13,2×4,5 мм (экспериментально установленный средний угол раскрытия факела 30°);
2. форсунки фирмы Lechler типа 665.122 (номинальный угол раскрытия факела 30°) и 665.123 (номинальный угол раскрытия факела 45°), расход воды 99,61 л/мин при давлении 5 атм.,
3. форсунки фирмы Lechler типа 665.042 (номинальный угол раскрытия факела 30°) и 665.043 (номинальный угол раскрытия факела 45°), расход воды 63,25 л/мин при давлении 5 атм.

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что несколько более эффективные параметры охлаждения и равномерность подачи охладителя обеспечивает третий вариант. Однако для его реализации потребуется закупка большого количества форсунок. Кроме того, точность изготовления коллекторов должна быть более высокой, чем при использовании форсунок с большим проходным сечением.

Первый и второй варианты близки, так как напорно-расходные характеристики форсунок с углом раскрытия факела 45° отличаются незначительно. В связи с этим были предложены конструкции коллекторов, в которых используются применяемые типы форсунок.

Выполненные расчеты показали, что использование предложенных коллекторов охлаждения позволит с малыми затратами повысить эффективность и равномерность охлаждения валков, в результате чего ожидаемое снижение температуры валков достигает 6-10°C в клетях № 6-9 и 1-6°C в клетях № 10-12.