

**С.М. Жучков, А.А. Горбанев, Г.В. Панчоха, В.А. Тищенко,  
И.В. Кошелев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
РАСКАТА В МЕЖКЛЕТЬЕВЫХ ПРОМЕЖУТКАХ НА ЕГО  
ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПРОКАТКЕ**

Приведены результаты исследований влияния принудительного охлаждения раската в межклетевых промежутках блока клетей современного высокоскоростного проволочного стана на температурное поле раската при прокатке катанки диаметром 6,5мм. Показано, что применение охлаждающих устройств в межклетевых промежутках блока не влияет на температуру центра раската.

На современных высокоскоростных проволочных станах применяют блоки чистовых клетей различных типов. Наибольшее распространение получили десятиклетевые блоки рабочих клетей стандартного типа, предназначенные для прокатки катанки из углеродистых, низколегированных и ряда легированных сталей. Суммарный коэффициент вытяжки при использовании всех десяти клетей блока составляет 9,0...9,2. Блоки такого типа установлены на проволочных станах 150 Белорусского металлургического завода, Макеевского и Криворожского металлургических комбинатов. Расстояние между клетями в четных межклетевых промежутках блока составляет 1200мм, в нечетных – 800мм.

При прокатке со скоростями порядка 80...100 м/с, достигнутыми в настоящее время, происходит значительный разогрев раската за счет тепла деформации и действия контактных сил трения. Приращение среднеинтегральной температуры при скорости прокатки 100 м/с и температуре раската на входе в блок 1000<sup>0</sup>С составляет около 100<sup>0</sup>С, а при скоростях 125...150м/с, закладываемых в проекты станов будущих поколений, приращение среднеинтегральной температуры при прокатке в блоках, может достигать 140...150<sup>0</sup>С. Повышение температуры раската на выходе из чистового блока снижает возможности управления структурой и свойствами катанки, а также затрудняет прохождение передним неохлажденным концом раската участка между чистовым блоком и виткоукладчиком, особенно при производстве катанки малых диаметров.

Охлажденный при контакте с валками тонкий поверхностный слой металла частично восстанавливает свою температуру в межклетевых промежутках блока, при этом повышение температуры поверхности зависит от коэффициента теплоотдачи в межклетевых промежутках. При отсутствии принудительного охлаждения раската между клетями блока

теплообмен раската с окружающей средой происходит за счет конвекции и лучеиспускания. Как показали расчеты по известным методикам, коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием  $\alpha_{\text{л}}$  невелик и составляет примерно 30 Вт/(м<sup>2</sup>К). Теплоотдача в межклетевых промежутках происходит в основном за счет конвекции. Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{\text{к}}$  зависит от скорости металла и возрастает по ходу прокатки от первого к последнему промежутку. Так, при конечной скорости прокатки 100м/с значение  $\alpha_{\text{к}}$  увеличивается от 90 Вт/(м<sup>2</sup>К) в первом промежутке до 380Вт/(м<sup>2</sup> К) в последнем, а при скорости 150м/с – от 95 до 525 Вт/(м<sup>2</sup>К). Фактический коэффициент теплоотдачи в промежутках между клетями блока будет больше за счет испарения воды, частично попадающей на раскат при охлаждении валков и арматуры.

Для частичной компенсации разогрева металла при прокатке в последних конструкциях чистовых блоков применяют устройства для принудительного охлаждения раската водой давлением 6 бар, устанавливаемые в четных межклетевых промежутках, где раскат имеет форму, близкую к кругу. Устройства принудительного охлаждения выполнены в виде турбулентных вставок, имеющих по длине местные сужения. В результате скорость воды по длине вставок изменяется, сбивается паровая рубашка, и эффективность охлаждения раската возрастает. Подобные конструкции применяют и на участках первичного охлаждения линий Стелмор, расположенных между чистовыми блоками и виткоукладчиками. Как в блоках, так и на участках первичного охлаждения применяют прямоточные устройства.

Для расчета теплообмена в блоке, изменения температурного поля раската по длине блока и оценки эффективности использования устройств принудительного охлаждения раската в межклетевых промежутках при различных скоростях прокатки, температурах раската на входе в блок и других технологических параметрах процесса необходимо знать коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при прохождении раскатом этих устройств.

Известно, что коэффициент теплоотдачи в установках ускоренного водяного охлаждения зависит от давления и расхода воды, времени нахождения раската в охлаждающих устройствах, определяемого длиной участка и скоростью раската, относительной скорости воды и раската, диаметра проката и внутреннего диаметра трубы, температуры воды и т.д. Данные, приведенные в технической литературе о величине коэффициента теплоотдачи, который следует принимать в расчетах процесса охлаждения, противоречивы.

В.И. Губинский на основании расчетов и экспериментальных исследований рекомендует принимать коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  для прямоточных форсунок при расходе воды 25 м<sup>3</sup>/ч равным 10000 Вт/(м<sup>2</sup>К), для противоточных – 107000Вт/(м<sup>2</sup>К), а при расходе воды 45м<sup>3</sup>/ч – соответственно 43400 и 213000 Вт/(м<sup>2</sup>К) [1]. В.В.Парусов, рассматривая процесс охлаждения катанки диаметром 6,5мм при скорости прокатки

30м/с, принимает коэффициент теплоотдачи  $\alpha=80000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ , при этом сделан вывод об одинаковой эффективности прямоточных и противоточных охлаждающих устройств [2].

П. Функе [3] на основании экспериментальных исследований охлаждения катанки на участке водяного охлаждения получил значения коэффициентов теплоотдачи в пределах 6000...17000 ккал/м<sup>2</sup>ч<sup>0</sup>С в зависимости от температуры и размеров образцов.

А. Хензель и Ф. Трельшц разработали математическую модель процесса охлаждения катанки на участке последняя клеть блока – виткоукладчик [4...5]. После корректировки модели на основании экспериментальных данных, полученных на действующих станах, рекомендованы значения  $\alpha=(15...30) 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

В работе [6] рассмотрен вопрос об эффективности применения турбулентных вставок для охлаждения раската между клетями блока и сделан вывод о возможности повышения коэффициента теплоотдачи до 150000 Вт/(м<sup>2</sup> К).

В условиях стана 150 МакМК, чистовые блоки которого оборудованы турбулентными вставками, выполнены экспериментальные исследования влияния охлаждения раската водой на его температуру при прокатке катанки диаметром 6,5 мм со скоростью 85 м/с. Охлаждающие устройства фирмы СКЭТ устанавливали попеременно после клетей 2, 4, 6, 8, в различных сочетаниях, а также во всех четных промежутках. Измеряли температуру раската на входе в блок и температуру поверхности катанки на выходе из блока. Затем расчетным путем определяли коэффициенты теплоотдачи в промежутках, где установлены турбулентные вставки, соответствующие измеренной разности температур раската на входе в блок и катанки на выходе из блока. Установлено, что коэффициент теплоотдачи в турбулентных вставках увеличивается в четных промежутках по ходу прокатки, что объясняется увеличением отношения длины дуги окружности (периметра) раската к площади поперечного сечения. При установке охлаждающих устройств во всех четных промежутках было принято среднее значение  $\alpha$ , равное 11500 Вт/(м<sup>2</sup>К), что дает результаты разности температур, близкие к измеренным.

Затем было рассчитаны температурные поля раската при прокатке в блоке. Использована методика, основанная на решении системы дифференциальных уравнений для металла, слоя окалины и валька конечно–разностным методом [7, 8]. При решении учтены особенности высокоскоростной непрерывной прокатки в чистовых блоках – влияние на мощность тепла пластической деформации и плотность теплового потока от контактных сил трения, массовых сил, межклетевых усилий и характера изменения сопротивления деформации металла от первой до последней клетки блока.

На рис.1 показано изменение температуры раската при прокатке в клетях блока стандартного типа катанки диаметром 6,5мм из стали У8 со

скоростью 85 м/с с принудительным охлаждением раската во всех четных межклетевых промежутках.

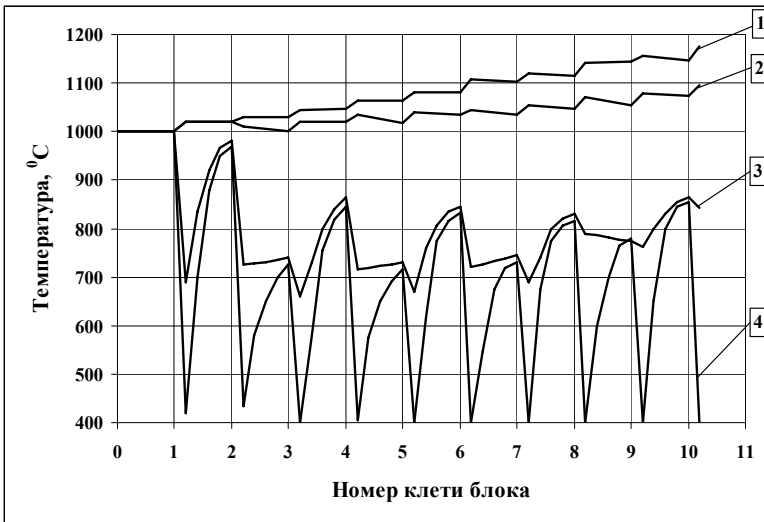


Рис.1 Температурное поле раската при прокатке в чистовом блоке стандартного типа с принудительным охлаждением раската после четных клеток (скорость прокатки 85м/с, диаметр катанки 6,5 м/с, температура металла на входе в блок 1000<sup>0</sup>С)

1 – температура центра; 2 – среднеинтегральная температура; 3 – температура поверхности металл–окалина; 4 – температура поверхности окалина–валок

Применение охлаждающих устройств не повлияло на температуру центра раската, которая повышалась от клетки к клетке по ходу прокатки. Характер изменения температур граничных поверхностей металл–окалина ( $T_{R1}$ ) и окалина – валок ( $T_{R2}$ ) различен при прокатке в блоке с охлаждающими устройствами и без них. Температура поверхности металла в четных промежутках, в которых установлены турбулентные вставки, изменяется незначительно, что свидетельствует о полном съеме тепла, поступающего от внутренних слоев металла к поверхности. Раскат в нечетные клетки задается с большим градиентом температур по сечению (280...320<sup>0</sup>С). При прохождении нечетных промежутков, где принудительное охлаждение отсутствует, температура граничной поверхности  $T_{R1}$  повышается на 100...280<sup>0</sup>С, при этом, чем ближе расположен промежуток к первой клетке блока, тем больше повышение температуры поверхности. В целом, за время прокатки в блоке температура граничной поверхности металл–окалина снижается на 180...200<sup>0</sup>С. Температура граничной поверхности окалина–валок  $T_{R2}$

повышается во всех межклетевых промежутках, при этом, в большей степени в тех промежутках, где отсутствует принудительное охлаждение.

Среднеинтегральным по сечению катанки температура на выходе из блока вследствие применения принудительного охлаждения между клетями изменяется незначительно, уменьшение  $T_{cp}$  не превышает  $10^{\circ}\text{C}$ .

С учетом возможности совершенствования конструкции блоков последующих поколений, рассчитанных на скорость прокатки до 150 м/с, и повышения эффективности устройств принудительного охлаждения раската в межклетевых промежутках, например, за счет увеличения давления воды, улучшения конструкций и др., выполнены расчеты температурного поля катанки диаметром 6,5 мм на выходе из блока при коэффициентах теплоотдачи в четных промежутках блока, равных 30000, 80000 и 150000 Вт/( $\text{m}^2\text{K}$ ) и температуре металла на входе в блок  $1000^{\circ}\text{C}$  (табл.1).

Установка устройства для межклетевого охлаждения раската в каком-либо одном промежутке не влияет на температуру центра раската и оказывает незначительное влияние на среднеинтегральную температуру катанки на выходе из блока даже при коэффициенте теплоотдачи, равном 150000 Вт/( $\text{m}^2\text{K}$ ). При установке охлаждающих устройств во всех четных промежутках даже при  $\alpha=150000$  Вт/( $\text{m}^2\text{K}$ ) температура центра катанки не изменяется, что свидетельствует о том, что центральные слои раската не участвуют в теплообмене.

Увеличение коэффициента теплоотдачи уменьшает температуру поверхности металл-окалина и в меньшей степени температуру поверхности окалина-валок. Среднеинтегральная температура также понижается за счет увеличения толщины охлажденного поверхностного слоя металла. Чем выше скорость прокатки, тем менее эффективно применение межклетевого охлаждения в блоке. При скорости прокатки 150 м/с использование устройств даже с  $\alpha=150000$  Вт/( $\text{m}^2\text{K}$ ) понижает среднеинтегральную температуру катанки лишь на  $60^{\circ}\text{C}$ .

Расчеты показали, что при скоростях прокатки 100...150 м/с и существующих конструкциях блоков с длиной четных межклетевых промежутков 1200 мм невозможно компенсировать разогрев металла в блоке. Невозможно также понизить температуру конца прокатки ниже  $1000^{\circ}\text{C}$  при температуре раската на входе в блок, равной  $1000^{\circ}\text{C}$ . При увеличении диаметра катанки обычно скорость прокатки снижается в меньшей степени, чем возрастает площадь поперечного сечения, поэтому данный вывод справедлив и для больших диаметров проката.

Таблица 1. Влияние интенсивности охлаждения раската в четных межклетевых промежутках блока на температуру катанки диаметром 6,5 мм из стали У8 на выходе из блока при температуре раската на входе в блок 1000<sup>0</sup>С

Скорость прокатки, м/с	Без принудительного охлаждения в блоке			Принудительное охлаждение с коэффициентом теплоотдачи, $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)								
				30000			30000			150000		
	T <sub>ср</sub> , °С	T <sub>R1</sub> , °С	T <sub>R2</sub> , °С	T <sub>ср</sub> , °С	T <sub>R1</sub> , °С	T <sub>R2</sub> , °С	T <sub>ср</sub> , °С	T <sub>R1</sub> , °С	T <sub>R2</sub> , °С	T <sub>ср</sub> , °С	T <sub>R1</sub> , °С	T <sub>R2</sub> , °С
75	1070	770	353	1019	676	311	995	625	283	962	600	269
100	1102	890	354	1066	797	325	1033	740	298	1016	712	284
125	1123	1020	359	1098	925	342	1068	864	315	1052	832	301
150	1150	1210	390	1136	1054	361	1112	989	334	1090	953	320

В настоящее время на зарубежных станах с относительно невысокой скоростью прокатки применяют высокотемпературную прокатку, при которой температура конца прокатки  $T_{к.пр.}$  на  $150...200^{\circ}\text{C}$  выше температуры начала структурных приращений (точка  $A_{Г3}$ ), нормализующую прокатку ( $T_{к.пр.}=T_{A_{Г3}}+(30...50)^{\circ}\text{C}$ ) и термомеханическую обработку (ТМО), при которой температура конца прокатки находится в двухфазной области ( $T_{A_{Г3}}...T_{A_{Г1}}$ ). Применение нормализующей прокатки и ТМО позволяет улучшить структуру и свойства катанки из ряда сталей, особенно легированных, и упростить технологию ее дальнейшего передела в сталепроволочном и метизном производстве [9...10].

Учитывая тенденцию расширения марочного сортамента, новые и реконструируемые высокоскоростные проволочные и сорто-проволочные станы должны иметь возможность, в зависимости от марки стали и назначения катанки, осуществлять все 3 режима, т.е. температура конца прокатки должна регулироваться в пределах  $750...1050^{\circ}\text{C}$ .

Охлаждение раската в межклетевых промежутках блоков понижает температуру поверхности раската, что уменьшает вероятность пробуксовок металла в валках при высоких скоростях и продольного изгиба раската в случае появления усилий подпора между клетями, но не дает возможности управлять температурой конца прокатки в требуемых пределах. Поэтому на станах, рассчитанных на скорость прокатки  $120...150$  м/с, необходимы организация интенсивного охлаждения раската перед блоками, понижение температуры начала прокатки и изменение компоновки и состава оборудования хвостовой части стана – вместо десятиклетевых чистовых блоков устанавливать мини-блоки, состоящие из  $2...4$  клеток с участками охлаждения раската между ними.

Выводы. Выполнены исследования влияния принудительного охлаждения раската в межклетевых промежутках блока клеток современного высокоскоростного проволочного стана на температурное поле раската при прокатке катанки диаметром 6,5мм.

Показано, что применение охлаждающих устройств межклетевых промежутках блока при любых коэффициентах теплоотдачи не влияет на температуру центра раската, которая повышается от клетки к клетке по ходу прокатки, что ограничивает возможности управления температурой конца прокатки в требуемых пределах.

Отмечено, что на проволочных станах, рассчитанных на скорость прокатки  $120...150$  м/с, необходимы организация интенсивного охлаждения раската перед блоками, понижение температуры начала прокатки и изменение компоновки и состава оборудования хвостовой части стана.

1. *Уменьшение* окалинообразования при производстве проката / В.И. Губинский, А.Н. Минаев, Ю.В. Гончаров // Киев: Техника. – 1981. – С. 135.
2. *Управляемое* термическое упрочнение проката / И.Г. Узлов, В.В. Парусов, Р.В. Гвоздев и др. // Киев: Техника. – 1989. – С. 118.
3. *Versuche* Zur Bestimmung der Gesamtwarmeübergang – szahl bei betrieblichen Abkühlssystemen Kontinuierlicher Warmwalzstraßen / P. Funke, J. Ashok, G. Kiefer / Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1977. – Vol. 48 – № 7. – S. 379–384.
4. *Berechnung* der Abkühlung von Feinstahl und Draht in Kiihlstrecke / A. Hensel, F. Troltsch, Z. Wolfersdorf / Neue Hiitte. – 1980. – № 8. – S. 299–301.
5. *Mathematische* Untersuchungen Zur Auslegung und steuerung von. Kiihlstrecken für Stabstahl und Drahtwalzwerke / A. Hensel, F. Troltsch // Neue Hiitte. – 1980. – № 10. – S/ 384–386.
6. *Rechnergestützte* ermittlung des temperaturverlaufs in primarkiihlstrecken und beim mit Swischengerüst – Kiihlung / A. Hensel, H. Wehage // Neue Hiitte. – 1988. – № 2. – S. 55–58.
7. *Деркач Д.А.* Разработка технологических основ высокоскоростной прокатки катанки в чистовых блоках проволочных станов / Дис. канд.техн.наук. – Днепропетровск. – 1987. – С. 199.
8. *Особенности* теплообмена и температурное поле полосы при высокоскоростной непрерывной прокатке в чистовых блоках клетей проволочных станов / Д.А. Деркач, А.П. Лохматов, Г.В. Панчоха и др. // ИЧМ. – Днепропетровск. – 1984. – С. 20. – Деп. в ВИНТИ, № 2680, чм 84.
9. *Сокращение* длительности технологического цикла в результате исключения термической обработки при производстве катанки и прутков / Й. Баль, Й. Клеменс, Р. Эль и др. // Черные металлы. – 1997. – Сентябрь. – С. 23–31.
10. *Контролируемая* прокатка и охлаждение качественных и высококачественных сталей / В. Браман, К.П. Эркель, В. Ленгерг и др. // Черные металлы. – 1997. – № 8. – С. 31–39.

*Статья рекомендована к печати д.т.н. В.В.Парусовым.*