

В. Д. Добряк /к. т. н./, А. Н. Степаненко,
Ю. Д. Угрюмов /к. т. н./
ГП УКРГИПРОМЕЗ
М. В. Губинский /д. т. н./
Национальная металлургическая академия Украины
А. Ф. Гринев /к. т. н./
ООО «НИИ “Укрметаллургинформ”»

Исследование охлаждения труб при гидросбиве окалины

Расчетным путем исследовано охлаждение труб при гидросбиве окалины с исходным давлением воды 180 МПа. На основе анализа теплообмена в пятнах натекания струй определены величины тепловых потерь на трубах $\varnothing 168 \times 8$ и $\varnothing 377 \times 9$ мм. Снижение среднemasсовой температуры труб не превышает 3°C и не может существенно повлиять на технологические режимы дальнейшей пластической деформации. (Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 24 назв.).

Ключевые слова: трубы, охлаждение, гидросбив окалины.

Tube cooling during water scaling with initial water pressure 180 MPa has been computationally researched. Analysis of heat exchange in the spots of jet impingement allowed to determine values of heat loss from the tubes of $\varnothing 168 \times 8$ and $\varnothing 377 \times 9$. Bulk temperature drop does not exceed 3°C and can not significantly influence technological modes of further plastical deformation.

Key words: pipes, cooling, water descaling.

Постановка проблемы

Удаление окалины с поверхности горячего металла способом гидросбива в различных процессах обработки давлением начинает широко применяться с конца 50-х годов прошлого столетия. К настоящему времени разработаны теоретические основы процесса гидросбива окалины, методики расчета установок гидросбива, в практическом плане создано высокоэффективное и надежное оборудование насосно-аккумуляторных станций, клапанно-распределительная аппаратура и рабочие форсунки, обеспечивающие требуемые параметры струи [1–12].

На заре освоения процесса рабочее давление жидкости не превышало $6 \div 8$ МПа, затем его повысили до $10 \div 12$ МПа для углеродистых сталей и до $17,5 \div 18$ МПа для легированных сталей. В настоящее время минимальным уровнем давления воды для гидросбива окалины считается 25 МПа. Имеется сообщение о применении давления до 48 МПа [5]. Научно-производственное предприятие технологий высокого давления «ИНДРИС» [12] создает водоструйное оборудование на давление до 120 МПа для различных технологических целей (очистка, резание, утилизация). Так как повышение рабочего давления жидкости ведет к росту затрат энергии, то фирмы – изготовители оборудования идут по пути сокращения расхода воды на обработку

единицы поверхности металла. Более 50 лет в этой области техники работают фирмы «Werner und Pfleiderer», «Lechler», «Sack» (ФРГ) и другие.

Изучение материалов фирм-изготовителей и научно-технической литературы по гидросбиву окалины показывает, что в центре внимания разработчиков находятся такие параметры, как сила, энергия, удельное давление (импакт) струи на поверхность и расход жидкости. Об охлаждающем действии струи на горячий металл упоминается как о факторе, вынуждающем снижать расход воды, если это действие приводит к недопустимой потере теплоты и снижению температуры металла. По-видимому, такое «невнимание» можно объяснить тем, что гидросбив окалины с горячих массивных изделий незначительно снижает их теплосодержание. Но если стоит задача гидросбива окалины с тонкостенных изделий, без теоретического анализа потерь теплоты и снижения температуры не обойтись. Например, в цехах горячей пилигримовой прокатки труб после дополнительного подогрева в печи с шагающими балками остро стоит проблема удаления окалины перед подачей трубы в калибровочный стан. Поэтому теоретическая оценка влияния гидросбива на охлаждение тонкостенной трубы приобретает актуальное значение.

Известно, что впервые был использован спрей на выходе труб из подогревательной печи

трубопрокатного стана «140» в цехе № 1 Южно-трубного завода, что позволило частично удалять окалину с поверхности труб размером 57–76 мм с толщиной стенки 3,5–10 мм и предохранять поверхность калибра валков от повреждения. Этот спреер был установлен еще в 1963 г. мастером редуционных и калибровочных станов.

Изложение основных материалов исследования

Вопросам жидкостного охлаждения высокотемпературного металла посвящено большое количество работ, например [13–21]. В них глубоко изучены гидродинамика струйного и капельного охлаждения, теплообмен струй и капель при натекании на стенку, прикладные задачи охлаждения горячекатаных изделий. В работе [22] представлены теоретические разработки теплообмена между окалиной и струей гидросбива. Однако в ней отсутствует решение прикладной задачи – расчета падения температуры изделия при гидросбиве для конкретных производственных условий. Поэтому в настоящей работе с использованием зависимостей, полученных для процесса струйного охлаждения горячего металла, выполнены исследования падения температуры тонкостенных труб при гидросбиве окалины после подогревательной печи перед подачей их в калибровочный стан. При этом приняты следующие допущения:

- средний удельный тепловой поток в пятне растекания струи, как показано в работе [13], практически не зависит от скорости натекания струи на поверхность металла;

- окалина не изолирует металл от воды, а уносится вместе с водой.

Давление у критической точки струи превышает атмосферное на величину $p = \frac{\rho V^2}{2} = 178,3 \text{ МПа}$, где $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды;

$V = 187 \text{ м/с}$ – скорость струи. Это давление в десятки раз превышает прочность окалины как на сжатие, так и на отрыв от металла [23], что позволяет утверждать, что в окрестности критической точки происходит дробление окалины. Учитывая, что скорость металла относительно оси струи также на два порядка меньше скорости струи в пятне растекания, можно считать, что разрушенная окалина покидает пределы пятна растекания почти мгновенно (в нашем случае за время $\sim 7 \times 10^{-5} \text{ с}$). Все это подтверждает правильность принятого допущения.

Рассмотрим схемы гидросбива окалины с наружной поверхности трубы диаметром 168 мм с толщиной стенки 8 мм (рис. 1) и трубы диаметром 377 мм с толщиной стенки 9 мм (рис. 2). Гидросбив осуществляется в кольцевом коллекторе, снабженном минимально необходимым количеством форсунок типа 642.805 «Skalemaster» фирмы «Лехлер»: в первом случае достаточно 9 форсунок, во втором – 21 форсунка. Форсунка 642.805 «Skalemaster» имеет следующие параметры:

- 1) давление воды в коллекторе – 180 бар;
- 2) расстояние от сопла форсунки до обрабатываемой поверхности – 110 мм;
- 3) ширина струи на расстоянии 110 мм – 56 мм;
- 4) толщина струи на том же расстоянии – 5,07 мм;
- 5) удельное давление струи на обрабатываемую поверхность на расстоянии 110 мм (импакт) – 1,84 МПа;
- 6) удельный расход воды через форсунку при давлении 180 бар – 96,6 л/мин.

Заметим, что данного типа форсунки успешно работают с 2005 г. на установке гидросбива окалины с заготовок в колесопркатном цехе ПАО «Интерпайп НТЗ».

Известно [13], что при нормальном натекании струи на поверхность образуется пятно рас-

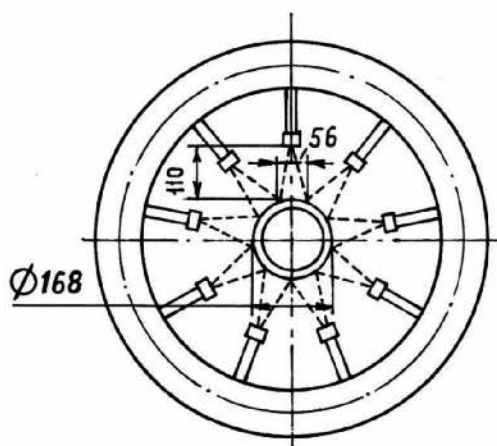


Рис. 1. Схема гидросбива окалины с трубы Ø 168×8

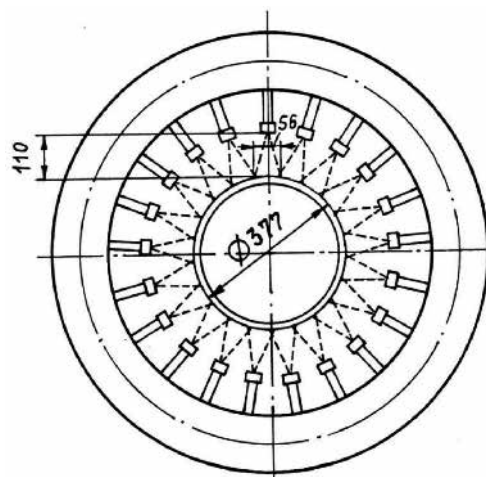


Рис. 2. Схема гидросбива окалины с трубы Ø 377×9

текания, которое разрушается на определенном расстоянии от оси струи. Это расстояние зависит от соотношения сил инерции жидкости и сил поверхностного натяжения, выражаемого числом Вебера:

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot D_c}{\sigma}, \quad (1)$$

где $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; v – скорость струи, м/с; $D_c = 5,07 \text{ мм}$ – толщина струи, условно принятая за диаметр осесимметричной струи; $\sigma = 727 \times 10^4 \text{ Н/м}$ – коэффициент поверхностного натяжения воды при 20°C [24].

Скорость струи на выходе из сопла форсунки определяли по эмпирической формуле А. Н. Верещагина:

$$v = 44 \sqrt{0,1 \cdot \Delta p} = 44 \sqrt{0,1 \cdot 180} = 187 \text{ м/с},$$

где $\Delta p = 180 \text{ бар}$ – перепад давления жидкости при выходе из сопла.

Тогда число Вебера согласно (1) будет равно 0,025.

Опытом установлено [13], что диаметр пятна растекания при $We < 500$ связан с числом Вебера соотношением:

$$D_n = 167 \cdot D_c \cdot We \quad (2)$$

Тогда величина D_n составит 21 мм.

Интенсивность теплоотвода от стенки трубы при натекании водяных струй зависит от режима кипения воды в пятне контакта струи со стенкой. Известно, что если температура стенки, равная в нашем случае 900°C , превышает температуру предельного перегрева жидкости (306°C), то при соприкосновении воды с металлической поверхностью наблюдается пленочный режим кипения. Толщина паровой пленки составляет порядка 1 мкм. Причем для образования паровой пленки требуется очень мало времени. Например, при температуре поверхности $T_n = 320^\circ\text{C}$ требуется 10^{-8} с , а при $T_i = 335^\circ\text{C}$ – 10^{-15} с [13]. В нашем случае при скорости трубы 1,5 м/с время контакта пятна растекания с металлом составляет $\tau = \frac{21 \cdot 10^{-3}}{1,5} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Поэтому можно считать, что при гидросбиве окалины в пятне растекания струи имеет место пленочное кипение.

Усредненное значение удельного теплового потока при пленочном кипении может быть вычислено по формуле [13]:

$$q = 0,5 \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c}{\tau} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_n - T_n$ – перегрев стенки по сравнению с температурой насыщения воды; $T_n = 100^\circ\text{C}$ – температура насыщения воды; $\lambda = 28 \text{ Вт/(мК)}$ – коэффициент теплопроводности стали 20 при температуре $800 \div 1000^\circ\text{C}$ [24]; $c = 4,22 \text{ кДж/(кг К)}$ – удельная теплоемкость воды на линии насыщения [24].

Величина удельного теплового потока охлаждения труб для условий работы установок гидросбива окалины составила $q = 65,7 \text{ МВт/м}^2$. Тогда суммарный тепловой поток через пятна растекания струй составит:

$$Q = q \cdot F, \quad (4)$$

где $F = n \cdot D_n \times b_k$ – суммарная площадь пятен растекания на поверхности трубы, м^2 ; n – количество форсунок, шт.; $b_k = 77 \text{ мм}$ – ширина растекания струи.

При скорости движения трубы через установку гидросбива $V_{mp} = 1,5 \text{ м/с}$ и длине труб $L_{mp} = 12 \text{ м}$ время обработки составит $\tau_{обр} = L_{mp} / V_{mp} = 8 \text{ с}$, а тепловые потери от трубы ΔQ и снижение ее температуры T в процессе гидросбива окалины будут равны:

$$\Delta Q = Q \times \tau_{обр}; \quad (5)$$

$$T = T_n - \frac{\Delta Q}{c \cdot m}, \quad (6)$$

где $c = 649 \text{ Дж/(кг К)}$ – удельная теплоемкость стали 20 в интервале температуры $850 \div 900^\circ\text{C}$ [24]; m – масса трубы, кг.

Результаты расчетов охлаждения труб при гидросбиве окалины для труб $\varnothing 168 \times 8$ и $\varnothing 377 \times 9$ приведены в табл. 1, из которой следует, что снижение среднемассовой температуры труб не превышает 3°C и не может существенно повлиять на технологические режимы дальнейшей пластической деформации.

Таблица 1

Результаты расчетов охлаждения труб при гидросбиве окалины с начальной температурой 900°C

Размер трубы, мм $D \times S$	Масса трубы длиной 12 м, кг	Суммарная площадь пятен растекания, $F, \text{ см}^2$	Тепловой поток в установке гидросбива, МВт	Тепловые потери от трубы, МДж	Снижение среднемассовой температуры трубы, $^\circ\text{C}$
168×8	380	145	0,96	0,765	3
377×9	980	339	2,23	1,784	2,8

Выводы

Расчет показывает, что применение экономичных плоскоструйных форсунок типа «Skalemaster» фирмы «Лехлер» (ФРГ) для гидросбива окалины с наружной поверхности тонкостенных труб после их нагрева в подогревательной печи с шагающими балками даст незначительное снижение температуры труб в пределах, допускаемых технологической инструкцией ($\leq 30^\circ\text{C}$).

Библиографический список

1. Müller – Sybrichs. Moderne hydraulische Entzunderungsanlagen, Stand und Entwicklung // Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterbearbeitung. – 1978. – № 9. – S. 670, 672–673, 675; № 11. – S. 961–962, 964–967.
2. Михеев В. А. Гидросбив окалины в прокатных цехах / В. А. Михеев, А. М. Павлов. – М.: Металлургия, 1964. – 108 с.
3. Оратовский Е. Л. Современные устройства для гидросбива окалины при прокатке / Е. Л. Оратовский, Е. А. Артамонова // Обзорная информация института «Черметинформация». Сер. 7. Прокатное производство. – 1980. – Вып. 3. – 25 с.
4. Владимиров Ю. В. Механическое удаление окалины с поверхности мелкосортной стали, катанки и проволоки за рубежом / Ю. В. Владимиров // Обзор института «Черметинформация», 1970. – 98 с.
5. Игельхорст В. 250 бар в борьбе с окалиной / В. Игельхорст, Б. Матц // Черные металлы. – 2007, июль – август. – С. 65–67.
6. Беккер Э.-А. Применение оптимизированных сопел для гидросбива окалины на широкополосном стане горячей прокатки фирмы «THYSSEN KRUPP STAHL AG» / Э.-А. Беккер, Г. Биркемайер, В. Бюхеле // Черные металлы. – 2000, декабрь. – С. 42–46.
7. Шатохин С. Е. Новое поколение форсунок для гидромеханического удаления окалины / С. Е. Шатохин // Сталь. – 2007. – № 11. – С. 130–132.
8. Бюхеле В. Удаление окалины после горячей прокатки / В. Бюхеле // Черные металлы. – 1996, март. – С. 38–40.
9. Бердичевский Ю. Е. Пути повышения эффективности систем гидромеханического удаления окалины станов горячей прокатки / Ю. Е. Бердичевский // Сталь. – 2004. – № 7. – С. 44–48.
10. Суков Г. С. Теоретические основы проектирования устройств для гидравлического удаления окалины / Г. С. Суков, В. И. Руденко, Е. В. Ошовская [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – № 1. – С. 35–38.
11. Павлитцки П. Инновационные решения для устройств удаления окалины / П. Павлитцки, Р. Ребейн // Черные металлы. – 2008, январь. – С. 37–42.
12. Байкалов В. А. Повышение эффективности и экономичности системы гидросбива окалины на основе опыта очистки печной окалины водоструйной установкой давлением до 700 бар / В. А. Байкалов, Г. Г. Грабовский, Т. Г. Шевченко // Металл и литье Украины. – 2001. – № 10–11. – С. 47–49.
13. Лабейш В. Г. Жидкостное охлаждение высокотемпературного металла / В. Г. Лабейш. – Ленинград: Из-во Ленинградского университета, 1983. – 172 с.
14. Белов И. А. Вопросы теплообмена струи с преградой / И. А. Белов, И. П. Гинзбург, Г. Ф. Горшков [и др.] // Тепло- и массоперенос. – Минск, 1972. Т. 1, ч. 2. – С. 271–281.
15. Динер А. Обзор литературы по теплопередаче при струйном охлаждении / А. Динер // Черные металлы. – 1976. – № 4. – С. 27–29.
16. Гончаров Н. В. Исследование теплообмена при струйном охлаждении металла водой и водовоздушной смесью / Н. В. Гончаров, Е. И. Казанцев, К. И. Ткалич [и др.] // Сталь. – 1977. – № 6. – С. 564–566.
17. Кадинова А. С. О характере теплообмена при струйном охлаждении / А. С. Кадинова, Г. Н. Хейфец, Н. Ю. Тайц // Инж.-физ. журнал. – 1963. – Т. 6. – № 4. – С. 46–50.
18. Кадинова А. С. Факторы, влияющие на теплообмен при струйном охлаждении / А. С. Кадинова, Г. Н. Хейфец // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1974. – № 1. – С. 10–14.
19. Юдаев Б. Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б. Н. Юдаев, М. С. Михайлов, В. К. Савин. – М., 1977. – 247 с.
20. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М., 1976. – 296 с.
21. Дитякин Ю. Ф. Распыливание жидкостей / Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков [и др.]. – М., 1977. – 208 с.
22. Теория и практика гидравлического удаления окалины с поверхности горячего проката / Н. Б. Жуков, Н. И. Пономарев, В. Г. Макшанцев [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2013. – 228 с.
23. Северденко В. П. Окалина при горячей обработке металлов давлением / В. П. Северденко, Е. М. Макушок, А. Н. Равин. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
24. Теплофизические свойства веществ: Справ. изд. / под ред. Н. Б. Варгафтика. – Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.

Поступила 03.11.2015