

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ НА СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Жуков Н. Б., Сус С. П.

Приведены результаты исследования эффективности струй гидромеханического удаления окалины. Установлено, что с уширением веера струи формируется сплошная турбулентная струя однородной смеси капель воды и воздуха, подавляющей объемной фазой которой является воздух. Получены теоретические зависимости, позволяющие определить рабочие параметры охладителя в зависимости от прочности удаляемой окалины. Разработан более эффективный способ удаления окалины на станах горячей прокатки. Обосновано, что механическому разрушению окалина подвергается в узкой зоне удара струи за весьма малый промежуток времени. Внедрение способа не требует больших затрат и позволяет без дальнейшего повышения рабочего давления воды повысить качество очищаемой поверхности.

Наведено результати дослідження ефективності струменів гідромеханічного видалення окалини. Встановлено, що при розширенні віяла струменя формується суцільний турбулентний струмінь однорідної суміші капель води та повітря, переважною об'ємною фазою якого являється повітря. Отримані теоретичні залежності, які дозволяють визначити робочі параметри охолоджувача в залежності від міцності окалини, яка видаляється. Розроблено більш ефективний спосіб видалення окалини на станах гарячої прокатки. Обумовлено, що механічному руйнуванню окалина підлягає в вузькій зоні удару струменя за дуже короткий проміжок часу. Впровадження способу не потребує значних витрат і дозволяє без подальшого підвищення робочого тиску води підняти якість зачищеної поверхні.

The main thought of the article is researching results of efficiency of jets of hydromechanical descaling. It is established that the broadening of the fan jet is formed by a continuous stream of turbulent homogeneous mixture of water droplets and air, the overwhelming bulk of which is the phase of the air. Theoretical dependence, to determine the operating parameters of the cooler, depending on the strength of a removable scale. Developed a more efficient way of removing scale in hot rolling mills. Substantiated that the mechanical destruction of dross is exposed in a narrow zone of impact of the jet in a very short time interval. Implementation method does not require costly and can not further increase the operating pressure to improve the quality of water surface being cleaned.

Жуков Н. Б.

канд. техн. наук, доц. кафедры АПП ДГМА  
app@dgma.donetsk.ua

Сус С. П.

канд. техн. наук, доц. кафедры АПП ДГМА

УДК 621.771.0.25

Жуков Н. Б., Сус С. П.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ НА СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Удаление окалины на станах горячей прокатки является народнохозяйственной проблемой повышения качества металлопродукции и перехода к энергосберегающим технологиям [1, 2]. Однако из-за сложности явлений, происходящих при взаимодействии струи с окружающим воздухом и раскаленной поверхностью раската, традиционное проектирование силовых гидравлических установок базируется, по сути, на опытных данных по «анalogии» и по «рекомендуемым» рабочим параметрам охладителя. В то же время, бесспорно, что чисто эмпирический подход к изучаемой проблеме, не опирающийся хотя бы на элементарную теорию, не может быть плодотворным [3].

Целью работы является определение основных рабочих параметров охладителя в зависимости от прочности удаляемой окалины и разработка наиболее рационального способа подачи его на обрабатываемую поверхность, позволяющих повысить качество готового проката и снизить затраты на гидроочистку.

На современных станах горячей прокатки окалину удаляют стационарными веерообразными (плоскофакельными) струями воды, истекающими через сопла гидроочистной установки высокого давления с большой скоростью. При натекании на преграду в окрестности критической точки скорость струйного потока замедляется, а давление в соответствии с уравнением Бернулли повышается и достигает непосредственно в критической точке максимума при  $v = 0$ :

$$p = \rho v^2 / 2, \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $v$  – плотность и скорость натекающей струи соответственно.

Основываясь на результатах измерения давления (1), авторы многочисленных работ пришли к единому мнению о том, что с удалением от сопла скорость струи уменьшается в первой степени, а давление – в квадрате. Вместе с тем измеренная динамическая сила воздействия струи на преграду, представляющая собой произведение постоянного массового расхода на скорость струи, оставалась практически неизменной. Вероятно, следует учитывать процесс взаимодействия струи с окружающим воздухом. Впервые такая задача была поставлена и решена в работе [2], в которой построили двухфазную модель струи, позволяющую избежать больших математических трудностей, но достаточно полно отражающую физическую сущность.

Согласно модели, истекая под высоким давлением через узкую щель сопла, жидкость распыляется непосредственно у среза сопла и эжектирует неподвижный воздух. В результате этого формируется сплошная турбулентная струя однородной смеси капель воды и воздуха. По мере удаления от сопла расход струи растет за счет эжектируемого воздуха.

Форма струи приближается к усеченной четырехгранной пирамиде, в основании которой лежит прямоугольник. Уширение струи легче всего измерить, например, по отпечаткам, полученным на относительно мягкой свинцовой пластине и дающим точное отображение струи. Расчетная схема струи рассматривается на рис. 1, а распределение давления в основании веера струи при торможении – на рис. 2. При построении распределения давления по ширине веера струи принят линейный закон и струя предполагается направленной по нормали к поверхности преграды.

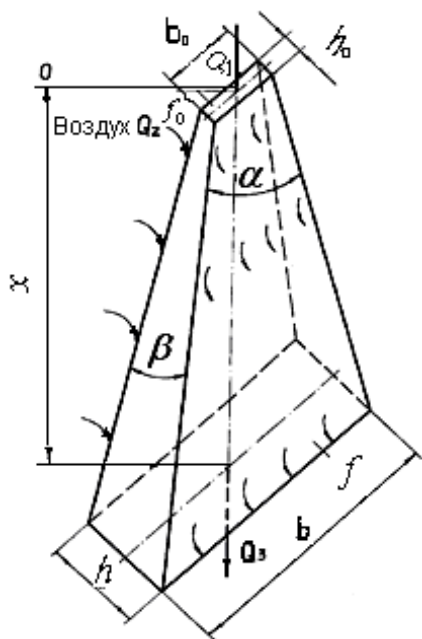


Рис. 1. К построению двухфазной модели струи

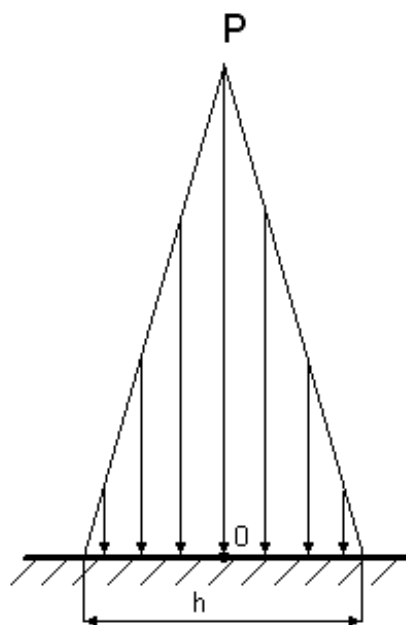


Рис. 2. Распределение давления в зоне удара струи

Площадь  $f$  поперечного сечения струи на расстоянии  $x$  от среза сопла связана с площадью  $f_0$  выходного отверстия сопла (см. рис. 1) соотношением:

$$\frac{f}{f_0} = \left( 1 + 2 \frac{x}{b_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left( 1 + 2 \frac{x}{h_0} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right), \quad (2)$$

где  $b_0$  и  $h_0$  – длина и ширина выходной щели сопла соответственно;  $\alpha$  – угол раскрытия веера струи;  $\beta$  – угол уширения струи.

На основании постоянства количества движения вдоль потока можно записать:

$$\rho_1 \cdot Q_1 \cdot v_0 = (\rho_1 \cdot Q_1 + \rho_2 \cdot Q_2) v, \quad (3)$$

где  $\rho_2$  – плотность воздуха;  $Q_2$  – расход воздуха, эжектируемого из окружающей среды;  $v$  – средняя скорость струи (смеси);  $v_0$  – скорость истечения воды.

Из уравнения (3) относительная скорость струи составит:

$$v/v_0 = 1/(1 + \gamma_0 \cdot \phi_0), \quad (4)$$

где  $\gamma_0 = \rho_2/\rho_1$  – относительная плотность;  $\phi_0 = Q_2/Q_1$  – относительный объемный расход.

На основании уравнения сплошности (неразрывности) потока имеем:

$$1 + \phi_0 = v \cdot f / Q_1. \quad (5)$$

Совместное решение уравнений (4) и (5) позволяет определить объемное газосодержание струи по мере удаления от сопла (в зависимости от  $f$ ):

$$\phi_0 = \left[ \left( \frac{1 + \gamma_0}{2\gamma_0} \right)^2 + \frac{1}{\gamma_0} \left( \frac{v_0 \cdot f}{Q_1} - 1 \right) \right]^{1/2} - \frac{1 + \gamma_0}{2\gamma_0}. \quad (6)$$

Плотность движущейся струи представлена зависимостью:

$$\rho_3 = \frac{\rho_1 \cdot Q_1 + \rho_2 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2} = \rho_1 \frac{1 + \gamma_0 \cdot \phi_0}{1 + \phi_0}. \quad (7)$$

При торможении (натекании на преграду) плотность струи повышается за счет адиабатного сжатия газовой фазы и может быть определена из соотношения:

$$\rho_{3p} = \frac{\rho_1(1 + \gamma_0 \cdot \phi_0)}{1 + \phi_0(p_0/p)^{1/k}}, \quad (8)$$

где  $p_0$  – давление окружающей среды (атмосферное давление);  $p$  – давление торможения;  $k$  – показатель адиабаты.

Интересной аномалией, присущей газожидкостной среде, является весьма малая скорость распространения звука, которая оказывается не только меньше, чем в жидкости, но так же значительно меньше, чем в газе. Поэтому возможно как дозвуковое, так и сверхзвуковое движение струи.

Из физики известно, что скорость звука в сжимаемой среде определяется зависимостью  $C = \sqrt{dp/d\rho}$ .

После дифференцирования уравнения (8) получим скорость звука в двухфазной среде:

$$C^2 = \frac{dp}{d\rho_{3p}} = \frac{[1 + \phi_0(p_0/p)^{1/k}]^2 \cdot k \cdot p_0}{\phi_0(p_0/p)^{(k+1)/k} \cdot \rho_1(1 + \gamma_0 \cdot \phi_0)}. \quad (9)$$

Для струи, распространяющейся в атмосфере окружающего воздуха ( $p = p_0$ ), скорость звука (9) составит:

$$C_0 = (1 + \phi_0) \sqrt{k \cdot p_0 / [\phi_0 \cdot \rho_1(1 + \gamma_0 \cdot \phi_0)]}. \quad (10)$$

Из газодинамики известно, что при дозвуковом движении давление в зоне торможения струи (давление на окалину) может быть найдено из выражения:

$$p/p_0 = (1 + 0,2M_0^2)^{3,5}, \quad (11)$$

а при сверхзвуковом – из соотношения:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{166,7M_0^7}{(7M_0^2 - 1)^{2,5}}, \quad (12)$$

где  $M_0 = v/C_0$  – локальное число Маха.

Полученные зависимости позволяют рассчитывать струю и дать принципиально новые представления о ее структуре.

Определены основные параметры веерообразной струи, истекающей под давлением  $p_1 = 18$  МПа чрез сопло с выходной щелью  $h_0 = 1$  мм;  $b_0 = 12$  мм;  $\alpha = 30^0$ ;  $\beta = 2^0$  (см. рис. 1).

Относительная площадь струи (2), объемное газосодержание (6), скорость звука (10), относительная скорость струи (4) и число Маха в зависимости от удаления сопла помещены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры струи в зависимости от удаления сопла  $x$

$x$ , мм	100	150	200	250	300
$f/f_0$	19,1	40,4	69,5	106,4	151
$\phi_0 = Q_2/Q_1$	20	42	71	105,8	145
$C_0$ , м/с	55	76,9	97,7	116,8	134
$\nu/\nu_0$	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87
$M_0 = \nu/C_0$	3,3	2,3	1,76	1,42	1,2

Плотность струи (8) и давление полного торможения, построенные на основании уравнений (11) и (12), в зависимости от удаления сопла представлены графически на рис. 3.

Если давление торможения в зоне удара струи достигает предела прочности окалины, последняя разрушается и смывается вместе с водой. Предел прочности вюстита (FeO), который составляет более 97 % всей толщины слоя окалины, в зависимости от температуры приведен на рис. 4 [3].

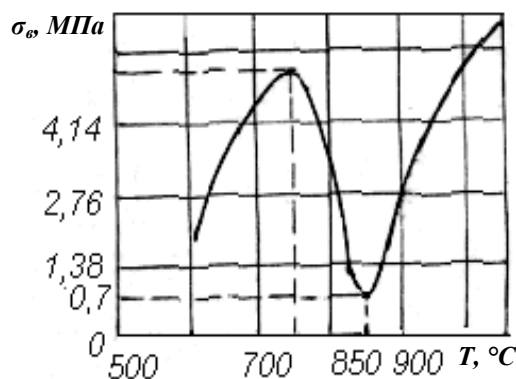
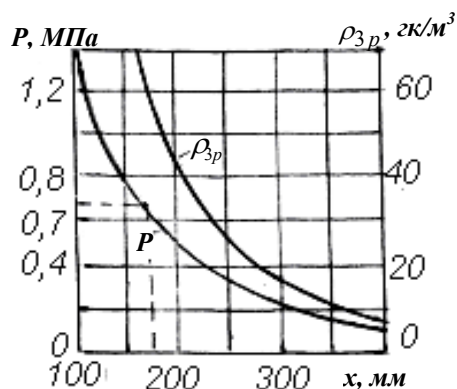


Рис. 3. Давление на окалину ( $P$ ) и плотность струи ( $\rho_{3p}$ ) в зависимости от удаления сопла ( $x$ ) при рабочем нагружении [3] давлении воды  $P_1 = 18$  МПа

Рис. 4. Зависимость предела прочности окалины от температуры при быстром нагружении [3]

Окалину подвергают механическому разрушению в узкой зоне удара струи за весьма малый промежуток времени  $t = h/v_M$ , где  $v_M$  – скорость проката. За такой короткий промежуток времени (миллисекунды) влиянием теплового воздействия струи можно пренебречь, предполагая чисто механическое разрушение окалины. При быстром нагружении окалина становится хрупкой и в зависимости от температуры её предел прочности изменяется так, как это показано на рис. 4. Минимальный предел прочности  $\sigma_b = 0,7$  МПа наблюдается при температуре  $T_K = 850$  °С. Для разрушения такой окалина достаточно обеспечить давление в зоне удара струи  $P = 0,7$  МПа, которое достигается при рабочем давлении воды  $P_1 = 18$  МПа и удалении сопла  $x = 170$  мм (см. рис. 3). С отклонением температуры от  $T_K$  предел прочности окалины резко возрастает и может превышать минимальное значение более чем в 10 раз.

В зависимости от режима нагрева металла в печах, длительности транспортирования проката в зону удара струи и интенсивности теплообмена на его поверхности температура окалины может изменяться в широких пределах. Экономически выгодно окалину разрушать при конечной температуре  $T_K = 850$  °С, соответствующей минимальному пределу прочности.

Разработан новый способ удаления окалины с поверхности нагретого проката, сущность которого состоит в том, что на входе узкой зоны удара непрерывно измеряют температуру проката и в зависимости от измеренной температуры окалину охлаждают от начальной температуры нагрева металла  $T_M$  до конечной температуры  $T_K$ , при которой окалина достигает минимального предела прочности. После этого окалину в узкой зоне удара разрушают и смывают вместе с водой [4].

Для охлаждения окалины от начальной до конечной температуры используют пристенную струю отработанного охладителя, образующуюся на поверхности проката после удара и разворота натекающих веерообразных струй. Пристенная струя распространяется по поверхности проката с большой скоростью и может вызывать интенсивное охлаждение окалины перед ее разрушением до температуры значительно ниже  $T_K = 850^\circ\text{C}$ . Устройство для осуществления способа удаления окалины с поверхности нагретого металла приведено на рис. 5.

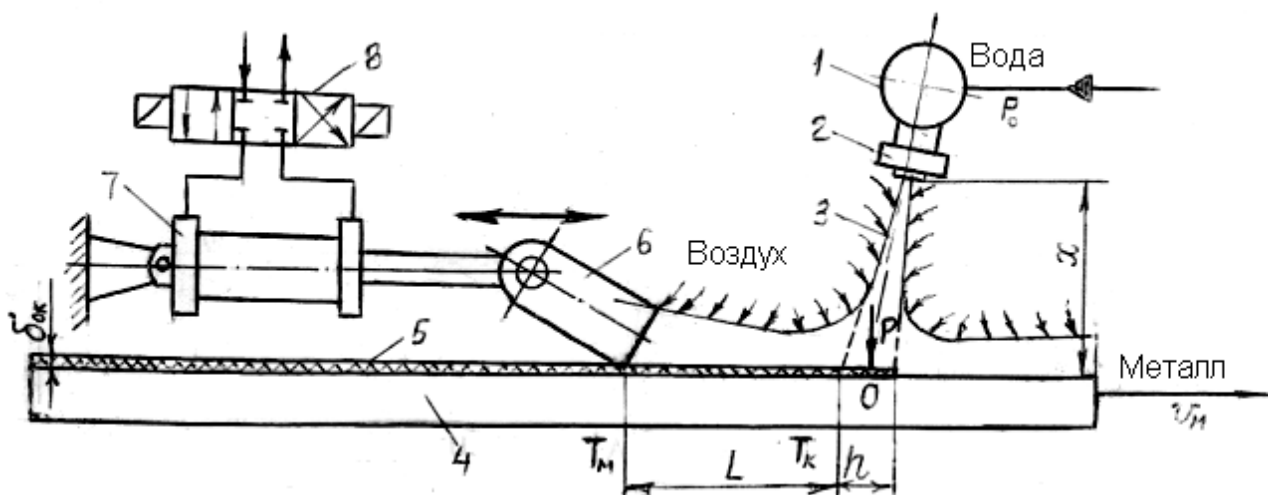


Рис. 5. Схема устройства для удаления окалины с поверхности проката:

1 – коллектор; 2 – сопло; 3 – струя веерообразная; 4 – прокат; 5 – окалины; 6 – отсекатель; 7 – гидроцилиндр перемещения отсекающего; 8 – электромагнитный распределитель

Как следует из рис. 5, струя 3 натекает на преграду 4, образуя узкую зону удара  $h$  и протяженную зону интенсивного охлаждения  $L$ , давление в которой атмосферное. Окалину охлаждают на длине  $L$  в течение времени [6]:

$$t = 0,125\sigma_{OK}^2/a = L/v_M, \tag{13}$$

где  $\sigma_{OK}$  и  $a$  – толщина и коэффициент температуропроводности окалины соответственно;  $v_M$  – скорость проката, при этом интенсивность теплоотдачи от окалины к натекающему потоку смеси можно определить по формуле, полученной в работе [5]:

$$\alpha_C = 0,89 \frac{\lambda_1}{L} \frac{G}{v_1} \ln \left[ 1 + 0,028 \left( \frac{v_1}{G} \right)^{0,25} \frac{L}{\delta_0} \right], \tag{14}$$

где  $\delta_0 = (8/7)G/v$  – толщина пограничного слоя;  $G$  – расход струи на единицу ширины;  $\lambda_1$  и  $v_1$  – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости охладителя соответственно. Оба параметра (13) и (14) зависят от длины  $L$  и определяют процесс охлаждения окалины.

Измеряя температуру поверхности проката  $T_K$  и регулируя длину  $L$ , можно поддерживать температуру окалины в зоне удара струи  $h$  на уровне, соответствующем минимальному пределу прочности окалины. В зависимости от измеренной температуры регулирование длины  $L$  осуществляют отсекателем 6, который перемещают в продольном направлении проката посредством гидроцилиндра 7, управляемого электромагнитным распределителем 8.

Обычно при разработке гидромеханического метода удаления окалины зону интенсивного охлаждения во внимание не принимают. Вместе с тем зависимости (13) и (14) являются основными параметрами теплового удара. Окалина при быстром охлаждении становится хрупкой, растрескивается и под действием сдвиговых (и отрывающих) напряжений, возникающих у границ трещин, отделяется от металлической основы. После этого отделившаяся окалина в узкой зоне удара струи дробится и смывается вместе с водой.

Эффект теплового удара зависит от расхода  $G$  струи и протекает при весьма низком рабочем давлении воды (по нашим исследованиям при  $P_0 = 0,4...0,8$  МПа, по данным японских исследователей при  $P_0 < 0,1$  МПа). Это позволяет создать гидравлические установки, обеспечивающие высокое качество очищаемой поверхности при весьма низких затратах энергии.

### ВЫВОДЫ

Установлено, что с уширением веера струи (удалением от сопла) формируется сплошная турбулентная струя однородной смеси капель воды и воздуха, подавляющей объемной фазой которой является воздух. Весьма низкое давление в зоне удара струи при высоком давлении истечения воды обусловлено уменьшением плотности смеси, а не потерей ее скорости, которая фактически уменьшается незначительно, так как масса ускоряемого воздуха значительно меньше массового расхода воды. Тепловое воздействие струи на окалину осложняется большим объемным содержанием воздуха, теплопроводность которого значительно меньше теплопроводности воды.

Получены теоретические зависимости, позволяющие определить рабочие параметры охладителя в зависимости от прочности удаляемой окалины. Анализ зависимостей показал, что эффективность гидроочистки может быть существенно повышена увеличением рабочего давления воды, или же приближением сопла к обрабатываемой поверхности, то есть за счет увеличения числа сопел и расхода воды (см. рис. 3).

Обосновано, что механическому разрушению окалина подвергается в узкой зоне удара струи за весьма малый промежуток времени. При быстром нагружении предел прочности окалины в зависимости от температуры изменяется так, как это показано на рис. 4.

Внедрение способа удаления окалины на действующих прокатных станах не требует больших затрат и длительной остановки стана и позволяет без дальнейшего повышения рабочего давления воды повысить качество очищаемой поверхности.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выбор рациональных параметров системы гидросбива с учетом свойств окалины на поверхности проката / Э. Шрадер, К. Козуб, Ю. Е. Бердичевский, Р. В. Руденко // Фазовые и структурные переходы в сталях : сборник научных трудов. – 2003. – Выпуск 3. – С. 536–545.
2. Жуков Н. Б. Двухфазная модель струи гидравлической очистки металла от окалины / Н. Б. Жуков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 11. – С. 82–84.
3. Северденко А. В. Окалина при горячей обработке металлов давлением / А. В. Северденко, Е. М. Макушок, А. Н. Равин. – М. : Металлургия, 1977. – 208 с.
4. Патент на корисну модель № 25776. Спосіб видалення окалини з горячекатаної смуги / Жуков М. Б. – (UA)-27/08/2007, Бюл. № 13.
5. Жуков Н. Б. Исследование теплообмена на участке замедленного течения пристенной струи / Н. Б. Жуков // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1987. – № 7. – С. 68–72.
6. Гидравлическое удаление окалины на станах горячей прокатки методом теплового удара не ее поверхности / Жуков Н. Б., Пономарёв Н. И., Сус С. П., Статива К. Ю. // Вісник ДДМА: зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – № 2. – С. 91–95.