

УДК 621.771: 024.2.001.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГИДРОСБИВА ОКАЛИНЫ С ГОРЯЧЕКАТАНОГО МЕТАЛЛА

*Залесов М.Д., к.т.н., доц., Гаврилюк Ю.Н., к.т.н., проф., Солошенко Е.А., студент,
Ярош Т.Л., студент*

Кременчугский государственный политехнический университет

имени Михаила Остроградского

39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

E-mail: nich@polytech.poltava.ua

Проведені дослідження механізму гідрозбиву окалини з гарячого прокату. Розроблено метод розрахунків напруг у окаліні під дією ударного та термічного ефекту струменів води високого тиску та показані шляхи їх використання при конструюванні систем гідрозбиву окалини. Запропоновано на рівні винаходу принципово новий селевий колектор.

Ключові слова: гідрозбив окалини, метал, конструкція сопла.

The investigations of the mechanism of the water descaling from the hot rolled stock were carried out. The method of accounts of voltage in descaling under the percussive and thermal effects of sheets of water worked out. There were shown the ways of their utilization during the designing of the systems of water descaling. It was suggested an essentially new header collector at the level of invention.

Key words: water worked, header, collector.

Введение. Гидросбив является одним из наиболее перспективных методов удаления окалины с горячего проката.

Эффективность удаления окалины при этом зависит как от прочности окалины, ее толщины, монолитности и сцепления с основным металлом, так и от параметров системы гидросбива.

Анализ предыдущих исследований. Существуют различные предположения о механизме гидросбива окалины и степени влияния механического и термического эффекта при этом.

В. А. Михеев и А. М. Павлов [1] считают, что удаление окалины при гидросбиве происходит, в основном, за счет механического разрыва окалины под воздействием силы удара струи, следовательно, конструкция сопла должна обеспечивать получение достаточно тонкой (острой) струи с высокой ударной силой. По их мнению основным вопросом в решении комплекса конструктивных задач при проектировании систем гидросбива является выбор оптимальной величины давления воды. Так, при применении сопел, дающих веерообразную струю, при удалении окалины с углеродистых сталей рекомендуется давление 120 кг/см², с легированных - 175 кг/см².

Исследователи Гармон и Проктер [2], изучая процесс гидросбива, пришли к выводу, что внезапное охлаждение окалины вызывает ее резкое сжатие, в результате чего окалина отделяется от поверхности металла. Чем внезапней охлаждение, и уже зона, тем эффективней окалиноудаление. Следствием такого подхода к объяснению механизма гидросбива окалины явилось создание щелевого сопла с повышенным удельным расходом воды (сопло дает узкую концентрированную струю), рекомендуемый

угол наклона струи к вертикали 55°. При таком расположении сопла удельное давление поток уменьшается приблизительно в 2 раза. Давление воды в системе составляет 100 кг/см².

В 1963 г. в статье [3] было сделано предположение о том, что отделение окалины при гидросбиве зависит от термического и механического воздействия струи, а также от воздействия пара, образующегося от проникновения воды под окалину. С учетом этого была спроектирована и опробована на заводе «Серп и молот» система гидросбива с использованием кольцевых сопел щелевого типа при давлении воды 200 кг/см².

Все эти предположения о механизме гидросбива окалины определяют принципиально различный подход к выбору основных параметров и конструкций устройств гидросбива.

Цель работы. Исследовать при гидросбиве: напряженное состояние окалины, теоретическим и экспериментальным путем оценить влияние различных факторов, выявить механизм разрушения окалины и на этой основе разработать мероприятия по повышению эффективности работы систем гидросбива.

Материалы и результаты исследования. Окалина при гидросбиве находится в сложном напряженном состоянии (рис. 1): на верхнюю поверхность действует давление струи воды p_0 , по боковым граням возникают нормальные напряжения σ_x и σ_y , а на поверхности раздела возникают как напряжения сдвига в двух направлениях τ_{xz} и τ_{yz} , так и отрывающие или прижимающие напряжения σ_0 . Напряжения σ_x , σ_y , τ_{xz} , τ_{yz} и σ_0 зависят не только от величины давления струи воды p_0 , но и от температурного перепада (разности температур металла и окалины).

Напряжения в плоскости окалины σ_x и σ_y от давления струи воды p_0 можно определить, используя закон Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)];$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)].$$

Принимая, что деформации в направлении осей x и y равны нулю, получим

$$\sigma_x = \sigma_y = -\rho_0 \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (1)$$

При этом нормальные напряжения по поверхности раздела окалины - металл

$$\sigma_0 = -\rho_0, \quad (2)$$

а касательные напряжения отсутствуют.

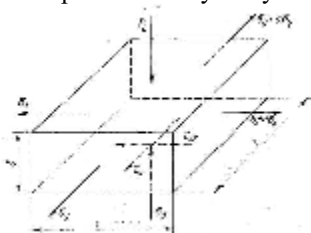


Рисунок 1 – Напряжения в окалине и на границе раздела окалины – металл

Исследования авторов показали, что полное удаление окалины с углеродистых и низколегированных марок сталей обеспечивается при удельном давлении струи гидросбива $p_0 = 1 \text{ кг/см}^2$.

При этом напряжения от механического воздействия струи гидросбива на окалину составляют

$$\sigma_x = \sigma_y = -0,5 \text{ кг/см}^2; \quad \sigma_0 = -1 \text{ кг/см}^2.$$

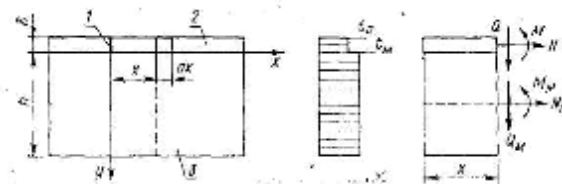
В процессе гидросбива окалины происходит её резкое охлаждение, которое вызывает появление температурных напряжений.

Анализ температурного воздействия струй гидросбива на окалину требует определения напряжений на поверхности раздела окалины - металл, так как при гидросбиве отделение окалины происходит, в основном, по этой поверхности, а не по поверхностям раздела окислов, из которых состоит окалины. По мнению И. Кана [4], именно в зоне поверхности раздела Fe - FeO напряжения имеют наибольшую величину, и в ней часто накапливаются примеси в форме включений, образуя добавочные центры разрушения. Так как металл растянут, а окисел сжат, поверхность раздела подвержена сдвигающим усилиям, которые в зависимости от ее однородности и величины истинной силы сцепления приводят к отделению металла от окисла или к разрушению окисла по поверхности, касательной к выступам металла. Кроме сдвигающих усилий, на поверхности раздела возникают отрывающие нормальные напряжения, вызванные стремлением слоя окалины, изогнувшись под действием температурного перепада.

В реальных условиях окалины имеет макроскопические дефекты: трещины, поры, полости, отслоения. Основные причины их образования -

состояние металла, напряжения роста окисного слоя, изменение условий реакции окисления (температуры, атмосферы, загрязнения посторонними частицами), механические воздействия и др.

Для определения температурных напряжений на поверхности раздела рассмотрим напряженное состояние окалины, включающей дефект типа трещины. В первом приближении распределение температур по толщине металла с окалиной принимаем по графику, приведенному на рис. 2.



1 - трещина; 2 - окалины; 3 - металл

Рисунок 2 – Расчетная схема, распределение температур и внутренние усилия:

Для анализа напряженного состояния окалины можно принять:

1) стремление окалины к сжатию под воздействием охлаждающей среды обуславливает ее сдвиг; изгиб окалины возможен только за счет растяжения (сжатия) в направлении, перпендикулярном слою окалины [5];

2) касательные напряжения по толщине окалины распределяются в соответствии с закономерностью М. М. Флоренко-Бородича (рис. 3), но которой сдвиг происходит, в основном, на высоте $\delta/3$, касательные напряжения на этом участке изменяются по линейной зависимости;

3) распределение нормальных отрывающих напряжений по толщине окалины соответствует графическому изображению на рис. 4, а нормальных напряжений, параллельных пленке - линейной зависимости, принятой для балок и плит.

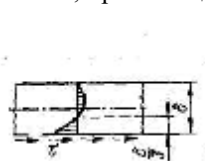


Рисунок 3 – Распределение касательных напряжений по высоте окалины [6]

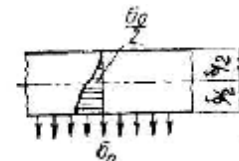


Рисунок 4 – Распределение нормальных напряжений по высоте окалины [7]

Поместим начало координат на границу дефекта, который находится в охлаждаемой водой зоне (рис. 2) и рассмотрим полосу шириной, равной 1.

Уравнения равновесия выделенного элемента окалины длиной dx (рис. 5) запишем в виде:

$$\sigma_0 = -\frac{dQ}{dx};$$

$$\tau = \frac{dN}{dx}.$$

Откуда

$$Q = \frac{dM}{dx} - \frac{\delta}{2} \frac{dN}{dx}; \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{d^2 M}{dx^2} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2 N}{dx^2}. \quad (4)$$

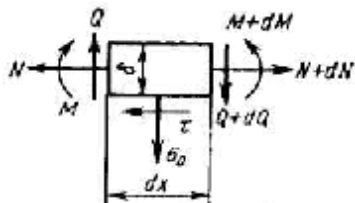


Рисунок 5 – Усилия, действующие на элемент пленки окалины длиной dx

В сечении x на границе раздела окалина - металл окалина сокращается на величину

$$\Delta = -\alpha_T x_\Delta t + \frac{1}{E_0} \int_0^x \left(\frac{N}{\delta} + \frac{6M}{\delta^2} \right) dx. \quad (5)$$

За счет сдвига слоя окалины, прилегающего к металлу, толщиной $\delta/3$

$$\Delta = \frac{\tau}{\kappa_1}, \quad (6)$$

где

$$\frac{1}{\kappa_1} \approx \int_0^{\delta/3} \frac{\tau(y) dy}{\tau G} = \frac{\delta}{6G}.$$

Приравнявая (5) и (6), получаем

$$-\alpha_T x_\Delta t + \frac{1}{E_0} \int_0^x \left(\frac{N}{\delta} + \frac{6M}{\delta^2} \right) dx = \frac{dN}{dx} \cdot \frac{1}{\kappa_1}.$$

После дифференцирования имеем

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \frac{\kappa_1}{E\delta} N = -\kappa_1 \alpha_T \Delta t + \frac{6\kappa_1}{E\delta^2} M. \quad (7)$$

Прогиб слоя окалины возможен только за счет изменения высоты поперечного сечения $y = -\sigma_0 \kappa_2$, где

$$\kappa_2 = \int_0^{\delta/2} \frac{\sigma(y) dy}{\sigma_0 E} = 0.406 \frac{\delta}{E}.$$

Принимая во внимание (4) и $E I y'' = -M$, получаем

$$\frac{d^4 M}{dx^2} + \frac{M}{\kappa_2 EI} = \frac{\delta}{2} \frac{d^4 N}{dx^4}. \quad (8)$$

Система дифференциальных уравнений (7) и (8) относительно функций M и N полностью описывает напряженное состояние полосы окалины, неотделившейся от металла. Разрешающим уравнения системы будет дифференциальное уравнение шестого порядка относительно N.

Поскольку толщина слоя окалины мала, изгиб играет меньшую роль, и действием изгибающего момента в первом приближении можно пренебречь, тогда уравнение (7) запишется следующим образом:

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \frac{\kappa_1}{E\delta} N = -\kappa_1 \alpha_T \Delta t.$$

Обозначив

$$\lambda = \sqrt{\frac{\kappa_1}{E\delta}} = \sqrt{\frac{6G}{E\delta^2}} \approx \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{3}{1+\mu}},$$

найдем

$$N = C_1 e^{-\lambda x} + C_2 e^{+\lambda x} + \alpha_T E \delta_\Delta t.$$

Из требования ограниченности усилий вытекает $C_2 = 0$. Определив постоянную интегрирования C_1 из условия на границе трещины ($x = 0, N = 0, C_1 = -\alpha_T E \delta_\Delta t$), получаем выражение для определения погонной продольной силы в слое окалины:

$$N = \alpha_T E \delta_\Delta t (-e^{-\lambda x} + 1). \quad (9)$$

Вдали от края трещины $N = \alpha_T E \delta_\Delta t$, а напряжения, параллельные слою окалины, $\sigma = \alpha_T E \Delta t$, т. е. такие же, как в сплошной окалине без трещин.

Подставляя выражение (9) в дифференциальное уравнение (8), определяем изгибающий момент в слое окалины:

$$\frac{d^4 M}{dx^4} + \frac{M}{\kappa_2 EI} = \frac{\delta}{2} \lambda^4 C_1 e^{-\lambda x}.$$

В силу ограниченности M общее решение уравнения получим в виде

$$M = e^{-\beta x} (C_3 \sin \beta x + C_4 \cos \beta x) + e^{\beta x} (C_5 \sin \beta x + C_6 \cos \beta x) + C_1 \frac{\delta \lambda^4}{\lambda^4 + \xi^4} e^{-\lambda x}. \quad (10)$$

В этом выражении

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{\kappa_2 EI}}; \quad \beta = \frac{\xi}{2}.$$

Постоянные интегрирования C_3 и C_4 находим из условий на границе трещины: при $x = 0; M = 0$ и $Q = 0$

$$C_4 = -C_1 \frac{\frac{\delta}{2} \lambda^4}{\lambda^4 + \xi^4} = \alpha_T E \delta_\Delta t \frac{\frac{\delta}{2} \lambda^4}{\lambda^4 + \xi^4}.$$

Так как поперечная сила равна

$$Q = \frac{dM}{dx} - \frac{\delta}{2} \frac{dN}{dx} = \beta e^{-\beta x} [C_3 (\cos \beta x - \sin \beta x) - C_4 (\cos \beta x + \sin \beta x)] + \frac{\delta}{2} \lambda \cdot C_1 e^{-\lambda x},$$

то

$$C_3 = C_4 - \frac{\lambda}{\beta} C_1 \frac{\delta}{2} = \alpha_T E \delta_\Delta t \frac{\delta}{2} \left(\frac{\lambda^4}{\lambda^4 + \xi^4} - \frac{\lambda}{\beta} \right)$$

Закон распределения сдвигающих напряжений вдоль границы раздела окалина - металл соответствует

$$\tau = \frac{dN}{dx} = -\lambda C_1 e^{-\lambda x}. \quad (11)$$

Максимальное сдвигающее напряжение возникает на границе трещины и равно

$$\tau_{\max} = -\lambda C_1 = -\alpha E \delta_\Delta t \lambda. \quad (12)$$

Закон распределения отрывающих напряжений вдоль границы раздела окалина - металл соответствует

$$\sigma_0 = -\frac{d^2 M}{dx^2} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2 N}{dx^2} = \beta^2 e^{-\beta x} [2C_3 \cos \beta x - 2C_4 \sin \beta x] - \alpha_T E \delta \lambda^2 \frac{\delta}{2} e^{-\lambda x}. \quad (13)$$

Максимальные отрывающие напряжения также возникают на краю трещины и равны:

$$\sigma_{0max} = 2\beta^2 C_3 - \alpha_T E \delta \lambda^2 \frac{\delta}{2} = \alpha_T E \delta \lambda^2 (\beta^2 - \frac{\lambda^2}{2}), \quad (14)$$

λ, ξ, β - коэффициенты, зависящие от толщины окалины и упругих констант, см⁻¹.

На рис. 6 приведены эпюры распределения сдвигающих и отрывающих напряжений по поверхности раздела окалины - основной металл вблизи трещины. Из эпюр видно, что дефекты типа трещин являются источником концентрации напряжений по границе раздела. Вдали от трещины напряжения на границе раздела практически равны нулю.

Максимальные сдвигающие напряжения у трещины сопровождаются максимальными отрывающими напряжениями, которые по мере удаления от трещины меняют знак (прижимают окалину к металлу) и быстро затухают. Напряжения же в плоскости окалины у трещины равны нулю, но быстро возрастают по мере удаления от трещины до постоянной величины.

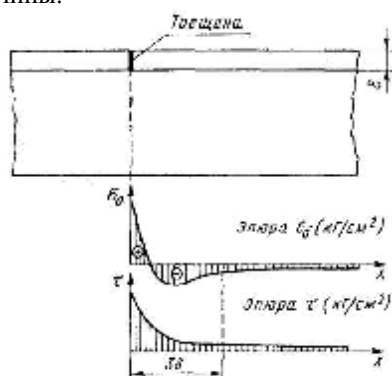


Рисунок 6 – Эпюры напряжений вблизи трещины при охлаждении окалины

Начало разрушения окалины вызывается растягивающими напряжениями и плоскости окалины, которые приводят к возникновению дополнительных трещин в окалине. Каждая трещина (первичная или вновь образовавшаяся) является концентратором напряжений на поверхности раздела металл-окалина. Если максимальные напряжения у трещины не превосходят сил адгезии, отслаивания окалины не происходит. Когда же напряжения превосходят силы адгезии, начинается сдвиг, сопровождаемый отрывом окалины от металла. По мере отрыва зона концентрации напряжений перемещается по поверхности раздела окалины - металл до следующего ослабленного дефектами сечения окалины. Этим можно объяснить то, что отделение окалины от основного металла в некоторых случаях происходит довольно большими участками.

Для сравнения с напряжениями, возникающими в результате механического воздействия струи гид-

росбива на окалину, проведем расчет термических напряжений по формулам (12) и (14):

$$\lambda = \frac{2.12}{\delta} \quad (\text{при } \mu = 0,33); \quad \xi = \frac{2.34}{\delta}; \quad \beta = \frac{1.66}{\delta};$$

$E = 1,4 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ (при $t = 750^\circ$ для стали) [8]; $\alpha_T = 13,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$ [4]; $\Delta t = 1^\circ\text{C}$.

При этом напряжения от механического воздействия струи гидросбива на окалину $\alpha_x = \alpha_y = 0,5 \text{ кг/см}^2$ значительно меньше, чем термические напряжения при перепаде температур между окалиной и основным металлом в 1°C $\alpha_{0max} = 9,7 \text{ кг/см}^2$, $\tau_{max} = 41 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_x^T = \sigma_y^T = 29 \text{ кг/см}^2$.

Как показали исследования Петерса и Энгелла [9], сила сцепления окалины с основным металлом (напряжения σ_0) при самых неблагоприятных условиях нагрева несколько превышает 100 кг/см^2 .

Сравнение величин напряжений, необходимых для удаления окалины, связанной с основным металлом силами сцепления и имеющей дефекты типа трещин, с температурными напряжениями, возникающими в результате воздействия струи гидросбива на окалину, показывает, что создание перепада температуры между окалиной и основным металлом более 10° обеспечивает отрыв окалины. Механическое же воздействие струи гидросбива на окалину в данном случае выражается в смыве окалины.

Наряду с участками окалины, плотно прилегающей к металлу, наблюдаются участки отслоившейся окалины. В этом случае, в связи с небольшой прочностью на изгиб и хрупкостью окалины, особую роль приобретает механическое воздействие струи гидросбива на окалину. Раздробление окалины происходит за счет появления изгибающего момента от давления струи гидросбива на слой окалины. Термические же напряжения на границе контакта окалины - металл близки к нулю, т.к. охлаждение отслоившейся части окалины приводит к ее сжатию, которому не препятствуют никакие внешние силы.

Описанный выше механизм гидравлического удаления окалины имеет место как при удалении первичной, так и вторичной окалины. Однако условия образования вторичной окалины накладывают определенный отпечаток на механизм ее удаления гидросбивом. Так как вторичная окалина образуется при $t \approx 900-1200^\circ\text{C}$ в течение короткого времени, имеет небольшую толщину и слабое сцепление с основным металлом, то для создания температурного перепада между окалиной и основным металлом, достаточного для отрыва окалины, требуется меньший удельный расход воды по сравнению с гидросбивом первичной окалины, а для механического раздробления окалины, отслоившейся от металла, и смыва окалины - меньшие по величине удельные давления струи, что подтверждается экспериментальными исследованиями [2]. В связи с этим расчет параметров систем гидросбива должен проводиться, исходя из условий удаления первичной окалины.

Анализ напряженного состояния окалины под действием струй воды высокого давления показывает, что напряжения от термического воздействия струи зависят от перепада температуры между ока-

линой и основным металлом, который, в свою очередь, является функцией удельного расхода воды, а напряжения в окалине от механического воздействия струи зависят от удельного давления струи. Это свидетельствует о том, что основными расчетными параметрами при проектировании систем гидросбыва должны быть удельный расход и удельное давление струи гидросбыва. В связи с этим были проведены экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики струй, истекающих из сопел и дающих веерообразную струю, которые позволили получить зависимости, связывающие основные параметры систем гидросбыва со всеми остальными параметрами.

Для сопел, дающих веерообразную струю:

$$q_v = \frac{1.4\mu f \sqrt{p}}{FV} \left(\frac{H}{H_i} \right)^2 \cos \gamma \text{ л/см}^2; \quad (15)$$

$$p_{0i} = \frac{1.2fp}{F} \left(\frac{H}{H_i} \right)^2 \cos^2 \gamma \text{ кг/см}^2; \quad (16)$$

где q_v - удельный расход воды при скорости перемещения раската под струями гидросбыва, V;

μ - коэффициент расхода;

V - скорость перемещения раската под струями гидросбыва, см/сек;

f - площадь выходной щели сопла, см²;

p - давление воды перед соплом, кг/см²;

F - площадь сравнительного сечения струи на расстоянии H от сопла, см²;

H - расстояние до сравнительного сечения, в котором удельное давление струи определено экспериментальным путем, см;

H_i - расстояние до рассматриваемого сечения, см;

γ - угол наклона струи к вертикали, град;

p_{0i} - удельное давление струи в рассматриваемом сечении струи.

Подставляя экспериментальные значения q_v и p_{0i} для углеродистых и низколегированных сталей в формулы (15) и (16), получаем зависимости для определения давления воды в системе и скорости перемещения раската под струями гидросбыва:

$$p = \frac{F}{1.2f \cos^2 \gamma} \left(\frac{H_i}{H} \right)^2 \text{ кг/см}^2; \quad (17)$$

$$V = \frac{20\mu f \sqrt{p}}{F} \left(\frac{H}{H_i} \right)^2 \cos \gamma \text{ м/с}. \quad (18)$$

Исследования эффективности удаления окалины на толстолистовом стане полностью подтвердили основные положения вышеизложенной теории гидросбыва окалины. В частности, значительное улучшение гидросбыва наблюдалось при уменьшении скорости перемещения раската под струями гидросбыва и при приближении коллекторов гидросбыва к нагревательным печам, что создает более благоприятные условия для проявления термического эффекта гидросбыва. Указанные мероприятия, проведенные одновременно с уменьшением расстояния от сопел до раската, показали принципиальную возможность значительной интенсификации работы систем гидросбыва без увеличения давления воды в

системе и, следовательно, без увеличения расхода электроэнергии за счет правильного использования всех резервов гидросбыва.

Выводы.

1. Разработан метод расчета напряжений, возникающих в окалине при гидросбыве, и на этой основе объяснен механизм гидросбыва окалины, который заключается в том, что удаление первичной и вторичной окалины с горячего проката происходит преимущественно за счет термического эффекта струй (для окалины, связанной с основным металлом силами сцепления) и механического эффекта (для окалины, частично или полностью отслоившейся от основного металла).

2. Анализ напряженного состояния окалины показал, что основными расчетными параметрами являются удельный расход воды и удельное давление струи, а теоретические и экспериментальные исследования параметров струй позволили получить зависимости (15), (16) для определения основных параметров гидросбыва.

3. Анализ формул для определения напряжений в окалине от гидросбыва (11) - (14) и формул для определения параметров гидросбыва (15) - (18), а также эксперименты по удалению окалины показали принципиальную возможность значительной интенсификации работы систем гидросбыва без повышения давления воды (давление воды в системе необходимо определять по формуле (17)) за счет активизации термического эффекта гидросбыва (уменьшение скорости перемещения раската под струями гидросбыва и приближение коллекторов первичной окалины гидросбыва к нагревательным печам) и механического эффекта (уменьшение расстояния от сопла до раската).

4. Конструкции коллекторов и сопел гидросбыва должна обеспечивать максимальную концентрацию струи, т. е. высокий удельный расход и удельное давление.

Этому требованию соответствует конструкция целевых секционных коллекторов гидросбыва окалины, созданная в КГПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев В.А., Павлов А.М. Гидросбыв окалины в прокатных цехах. -М.: Металлургиздат, 1964. - С. 8-10
2. Harmon G., Proctor R. //Iron and Steel Engineer, - 1958. № 12. -С. 37-42.
3. Залесский В.И., Цвентарный А.М., Корнеев Д. М., Жуков А. А Удаление окалины гидравлическим способом. //Известия вузов. - 1963. № 3. -С. 64-67.
4. Бснар Ж. Окисление металлов. Т. I, II Пер. с франц. -М.: Металлургиздат. - 1968. -С. 263-268.
5. Короткова С.Е. Напряженное состояние клеевого соединения с односторонней накладкой//ДАН УССР. -1967. - № 7, серия Л. -С. 1-11.

Статья поступила 16.11. 2007

Рекомендована к печати д.т.н., проф.
Масловым А.Г.