АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ГИДРОСБИВА ОКАЛИНЫ ДЛЯ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

*ГНПК «Киевский институт автоматики», г. Киев, Украина

**Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Одним із найважливіших показників якості прокату є чистота його поверхні, яка, у свою чергу, визначається наявністю або відсутністю поверхневих дефектів. Дослідження, проведені на ряді товстолистових станів, показали, що лише невелика частина прокатої продукції (близько 10%) не вимагає зачистки з використанням абразивних інструментів. У даний час найбільш ефективним і економічним способом видалення первинної окалини є гідравлічний, реалізований струменем води, що б'є з сопла під високим тиском. У статті розглянуті принципи розрахунку параметрів пристрою гідрозбивання окалини з роторними головками. Використано експериментальні дані для наближеного вибору параметрів струменя гідрозбивання. Показано, що ефективність видалення окалини істотно пов'язана з маркою сталі, що проілюстровано відповідними графіками, а також зі швидкістю рідини на виході обертових роторних головок. Розглянуто функції автоматизованої системи гідрозбивання окалини для стану гарячої прокатки, наведено структурну схему комплексу технічних засобів, проаналізовано основні принципи побудови системи. Описані вище технічні рішення, що включають нову високоефективну енерго- і ресурсозберігаючу технологію гідроочищення поверхні металу, технічні засоби високого тиску води і автоматизовану систему управління обладнанням високого тиску, яка реалізує розроблену технологію, використані в автоматизованій системі гідрозбивання окалини (АС ГЗО), впровадженій у промислову експлуатацію на товстолистовому стані 2800. Ця розробка може бути впроваджена практично на всіх металургійних комбінатах України та країн ближнього зарубіжжя.

Ключові слова: прокатний стан, гідрозбивання, роторні головки, параметри струменя, автоматизована система гідрозбивання окалини, економічна ефективність.

Аннотация. Одним из важнейших показателей качества проката является чистота его поверхности, которая, в свою очередь, определяется наличием или отсутствием поверхностных дефектов. Исследования, проведенные на ряде толстолистовых станов, показали, что лишь небольшая часть прокатанной продукции (около 10%) не требует зачистки с использованием абразивных инструментов. В настоящее время наиболее эффективным и экономичным способом удаления первичной окалины является гидравлический, реализуемый струей воды, бьющей из сопла под высоким давлением. В статье рассмотрены принципы расчета параметров устройства гидросбива окалины с роторными головками. Используются экспериментальные данные для приближенного выбора параметров струи гидросбива. Показано, что эффективность удаления окалины существенно связана с маркой стали, что проиллюстрировано соответствующими графиками, а также со скоростью жидкости на выходе вращающихся роторных головок. Рассмотрены функции автоматизированной системы гидросбива окалины для стана горячей прокатки, приведена структурная схема комплекса технических средств, проанализированы основные принципы построения системы. Описанные выше технические решения, включающие новую высокоэффективную энерго- и ресурсосберегающую технологию гидроочистки поверхности металла, технические средства высокого давления воды и автоматизированную систему управления оборудованием высокого давления, реализующую разработанную технологию, использованы в автоматизированной системе гидросбива окалины (АС ГСО), которая внедрена в промышленную эксплуатацию на толстолистовом стане 2800. Эта разработка может быть внедрена практически на всех металлургических комбинатах Украины и стран ближнего зарубежья.

Ключевые слова: прокатный стан, гидросбив, роторные головки, параметры струи, автоматизированная система гидросбива окалины, экономическая эффективность.

Abstract. One of the most important indicators of the rolling quality is the cleanliness of its surface, which in turn is determined by the presence or absence of surface defects. Studies conducted on a number of rolling mills have shown that only a small part of the rolled products (about 10%) do not require stripping using abrasive tools. Currently, the most effective and economical way to remove primary scale is hydraulic, realized by a jet of water, beating from a nozzle under high pressure. The paper discusses the principles of calculating the parameters of the descaling device with rotor heads. The experimental data are used for an approximate choice of the hydroblow jet parameters. It is shown that the efficiency of descaling is significantly related to the grade of steel, which is illustrated by the corresponding graphs, as well as with the fluid velocity at the outlet of the rolling rotor heads. The functions of an automated descaling system for a hot rolling mill are considered, a block diagram of a set of technical equipment is given, and the basic principles of building a system are analyzed. The technical solutions described above, including a new highly efficient energy and resource-saving technology for hydrotreating a metal surface, high-pressure water technology and an automated control system for high-pressure equipment that implements the developed technology, were used in an automated hydrodescaling system (AHDS), which was put into commercial operation on a rolling mill 2800. This development can be implemented in almost all metallurgical plants in Ukraine and neighboring countries.

Keywords: rolling mill, hydrodescaling, rotor heads, jet parameters, automated hydrodescaling system, economic efficiency.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-1-110-127

1. Введение

Одним из важнейших показателей качества проката является чистота его поверхности, которая, в свою очередь, определяется наличием или отсутствием поверхностных дефектов. Исследования, проведенные на ряде толстолистовых станов, показали, что лишь небольшая часть прокатанной продукции (около 10%) не требует зачистки с использованием абразивных инструментов.

В настоящее время в основном применяют следующие способы удаления первичной печной окалины: механический – с применением окатиноломателей; фрезерный; огневой; паровзрывной – с использованием лунчатых валков; гидравлический [1, 2].

Как показала практика, наиболее эффективным и экономичным способом удаления первичной окалины является гидравлический, реализуемый струёй воды, бьющей из сопла под высоким давлением. В работах [1, 2] сформулирован комплексный механизм гидравлического удаления окалины, состоящий из 4-х компонент:

- механическая компонента струи, определяемая давлением удара, приводящего к взламыванию корки окалины;
- термическая компонента, которая является следствием резкого снижения температуры (термический удар), приводящая к растрескиванию окалины вследствие разницы термической усадки с основным металлом;
- пневматическая компонента, возникающая в результате взрывного парообразования, что дополнительно дробит и удаляет окалину;
- гидравлическая компонента, то есть смыв окалины горизонтальной составляющей струи, образовавшейся вследствие преломления о поверхность металла струи из сопел и которая также является функцией ударного давления струи.

При гидравлическом способе очистки в качестве рабочей среды используют воду под большим давлением, а непосредственно исполнительным устройством является сопло, назначение которого состоит в создании струи воды, и подвод её в определённой форме с высокой скоростью к раскалённой поверхности, чтобы не только взорвать слой окалины, но и быстро удалить её с поверхности заготовки.

В большинстве применяемых в Украине и странах ближнего зарубежья системах гидросбива окалины струя воды подается под сравнительно низким давлением – в диапазоне 8–15 МПа. Эти системы не обеспечивают создание необходимого скоростного напора

струи воды, способного эффективно очищать заготовки от окалины. На слябах остаются зоны с неполной очисткой от окалины, что снижает качество проката и допускает брак. Сопла, используемые в этих системах, имеют относительно большие диаметры выходных отверстий (5–8 мм) и устанавливаются на специальные траверсы. На каждой из них несколько десятков сопел (20–40 в зависимости от ширины прокатываемого раската). Вдоль линии прокатки имеется несколько мест установки таких траверс, чем обусловлен большой расход воды (до 5000 м³/ч), что, в свою очередь, требует установки соответствующих электродвигателей, мощность которых достигает нескольких тысяч киловатт. Также следует отметить, что из-за отсутствия современных систем и средств автоматики затраты электроэнергии при работе существующих систем гидросбива окалины в несколько раз превышают необходимые [3].

Над созданием эффективных и менее энергоемких систем гидросбива окалины работают многие зарубежные фирмы. Например, японской фирмой «Сумитомо Кендзеку Коту К.К.» предложена система с регулировкой расхода жидкости на основе предварительно установленного соотношения между маркой стали, толщиной полосы, температурой смотки, скоростью транспортировки полосы и расхода жидкости на единицу поверхности, очищаемой от окалины полосы. Западные фирмы разработали систему гидросбива с рабочим давлением 20–50 МПа и уменьшенным расходом воды [3].

Применение аналогичных систем гидросбива в Украине и странах ближнего зарубежья сдерживалось до недавнего времени из-за отсутствия надежной водоструйной техники с плунжерными насосами и роторными головками на давление 60 МПа и выше. Сейчас такая техника создана и успешно применена в Украине на толстолистовом стане 2800 при создании автоматизированной системы гидросбива окалины (АС ГСО) [4]. Полученные результаты очистки слэбов от окалины позволили проверить теоретические зависимости, описывающие технологические параметры гидроочистки проката [5, 6].

2. Принципы расчета технологических параметров устройства гидросбива с центробежными роторными головками

Рассмотрим принципы расчета технологических параметров устройства гидросбива с центробежными роторными головками для автоматической настройки системы на каждый конкретный слэб [6].

Эффективность работы системы оценим критерием качества

$$K_i = \left(\frac{S_{cli} - S_{o.зadі}}{S_{cli}} \right) = K_{zadі}.$$

Фактическая реализация критерия качества выразится аналогично:

$$K_{факті} = \left(\frac{S_{cli} - S_{o.факті}}{S_{cli}} \right).$$

Тогда математически задача ставится следующим образом. Определить параметры настройки автоматизированной системы управления устройством гидравлического удаления окалины – P , Q , v_{cl} , h , обеспечивающие минимум целевой функции F_u ,

$$\min F_u = \min[\sigma(K_{факті} - K_{zadі})]$$

с соблюдением ограничений:

$$Q \leq Q_{дон}, P \leq P_{дон}, h \leq h_{\min}, v_{cl} \leq v_{cl.\min}, \Delta t_{нов} \leq \Delta t_{нов.дон},$$

где $F_{\text{ц}}$ – целевая функция качества процесса управления (показатель качества), характеризующая степень очистки поверхности сляба от окалины; $S_{\text{сл}}, S_o$ – площади поверхностей сляба – полная и очищенная от окалины; σ – среднеквадратичное отклонение показателя качества; $P, P_{\text{доп}}$ – давление воды в системе гидросбива и его допустимое значение; $Q, Q_{\text{доп}}$ – полный расход жидкости в системе и его допустимое значение; $v_{\text{сл}}, v_{\text{сл min}}$ – скорость движения сляба в камере гидросбива и ее минимально допустимое значение; h, h_{min} – расстояние от сопла до поверхности сляба в камере гидросбива и его минимально допустимое значение; $\Delta t_{\text{нов}}, \Delta t_{\text{нов доп}}$ – фактическое и допустимое снижение температуры поверхности металла в камере гидросбива; $i = 1 \dots n_{\text{п}}$, где i – номер сляба; $n_{\text{п}}$ – количество слябов в каждой данной партии.

В существующем стандарте на качество поверхности горячекатаного металла отсутствуют количественные требования к чистоте поверхности листов. Это обстоятельство следует понимать так, что вся поверхность каждого листа (заготовки) не должна содержать пороков прокатного процесса. Таким образом, должно выполняться условие $S_{o. \text{зад}} = S_{\text{сли}}$ и $K_{\text{зоди}} = 0$. Тогда целевая функция $F_{\text{ц}}$ принимает вид

$$F_{\text{ц}} = \min[\sigma(K_{\text{факт}})] = \min \left[\sigma \left(\frac{S_{\text{сли}} - S_{oi}}{S_{\text{сли}}} \right) \right]. \quad (1)$$

С другой стороны, $F_{\text{ц}}$ представляет собой функцию с векторным аргументом

$$F_{\text{ц}} = f(P_{\text{yd}}, Q_{\text{yd}}, w_{\text{ок}}, \sigma_{\text{ок}}), \quad (2)$$

компоненты которого являются технологическими параметрами системы и физическими свойствами окалины: P_{yd} – удельное давление удара струи гидросбива на единицу площади поверхности сляба; Q_{yd} – удельный расход жидкости на единицу площади поверхности сляба; $w_{\text{ок}}$ – количество окалины на поверхности сляба; $\sigma_{\text{ок}}$ – прочность сцепления окалины с поверхностью сляба.

Зависимости для определения параметров $P_{\text{yd}}, Q_{\text{yd}}, w_{\text{ок}}, \sigma_{\text{ок}}$ приведены в [6].

Удельное давление струи гидросбива

$$P_{\text{yd}} = \frac{F_{\text{yd}}}{S} = \frac{\rho Q_{\text{cn}} v}{S}, \quad (3)$$

где F_{yd} – полная сила удара струи на поверхности сляба в зоне следа сопла, S – площадь следа сопла, Q_{cn} – расход жидкости через сопло:

$$Q_{\text{cn}} = \mu s_{\text{cn}} v, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода, s_{cn} – сечение выходного отверстия сопла, v – скорость струи, ρ – плотность воды, $\mu = a + \frac{B}{\sqrt{\text{Re}}}$, a, B – константы, Re – число Рейнольдса.

Удельный расход жидкости

$$Q_{\text{yd}} = \frac{Q}{B_{\text{сл}} v_{\text{сл}}} = \frac{n Q_{\text{cn}}}{B_{\text{сл}} v_{\text{сл}}}, \quad (5)$$

где n – количество сопел гидросбива, B_{cl} – ширина сляба.

Количество окалины на поверхности сляба:

$$w_{ок} = k_0 \sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right), \quad (6)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, τ – время пребывания сляба в печи, Q_a – энергия активации, R – газовая постоянная, T – температура нагрева сляба.

Прочность сцепления окалины с металлом:

$$\sigma_{ок} = \sigma_{ок}(C, Si, Ni, T_{c2}), \quad (7)$$

где C, Si, Ni – процентное содержание в стали углерода, кремния, никеля и т.п., T_{c2} – температура поверхности сляба в зоне гидросбива.

Потери тепла в камере гидросбива определяются согласно выражению [7]

$$\Delta t_{нов} = \frac{k_m Q (T_{c2} - T_{вд})}{v_{cl} H_{cl}}, \quad (8)$$

где k_m – коэффициент пропорциональности, $T_{вд}$ – температура воды в системе гидросбива, H_{cl} – толщина сляба.

Решение системы уравнений (2)–(8) дает значения вышеупомянутых параметров устройства управления гидросбивом печной окалины для любой, наперед заданной марки стали с учетом окисляющих характеристик применяемого топлива и времени нагрева заготовки в печи. Основная трудность при решении такой математической задачи состоит в том, что в настоящее время отсутствуют аналитические зависимости, связывающие прочность сцепления окалины конкретной марки стали с поверхностью горячего металла, а также зависимости, характеризующие необходимую силу удара струи о поверхность заготовки и гарантирующие полное удаление данного вида окалины с очищаемой поверхности.

Рисунок 1 – Условия полной очистки для разных сталей:

- 1 – раскисленной алюминием с 0,04%С;
- 2 – нелегированной углеродистой стали с 0,2%С; 3 – кремниво-марганцевой стали;
- 4 – низколегированной стали с 0,5%Ni,Cr,Mo; 5 – стали с 3%Ni,Cr;
- 6 – автоматной стали

Однако в течение последних лет в мире накоплено достаточное количество экспериментальных данных, дающих такие связи для довольно широкого набора марок сталей как углеродистых, так и легированных, которые могут быть использованы в качестве первого приближения для выбора необходимых параметров струи устройства гидравлического удаления окалины. На рис. 1 представлены характеристики взаимозависимости удельного удара струи и удельного расхода жидкости на единицу поверхности очищаемой заготовки (ограничительные характеристики), гарантирующие полное удаление окалины для ряда сталей [8]. Область справа от прямых определяет необходимые параметры струи, обеспечивающие полную очистку окалины. Результаты этих исследований показывают, что слябы из нелегированных (углеродистых) марок стали легко очищаются от окалины. Удельное давление удара, равное 0,1 МПа, бывает достаточным даже при низком расходе воды. Практически при высоте

сопел 100 мм давление в системе должно составить 4 МПа. Раскисленные стали при содержании 0,04% С для уверенной очистки требуют удельное давление удара 0,2 МПа. Низколегированная сталь с 0,5% Ni, Cr, Mo требует большего количества воды, чем чисто углеродистая сталь. Стали с содержанием 3%Ni,Cr имеют липкую окалину, требующую давления удара около 0,4 МПа и небольшого количества воды для ее удаления. При ударе 0,4 МПа и скорости движения заготовки 0,5 м/с возможно удаление основного слоя окалины, но остается шероховатый слой остаточной окалины толщиной около 0,2 мм.

Однако кремнисто-марганцевые стали формируют чрезвычайно липкую окалину, требующую для своего удаления удельного удара свыше 1,5 МПа при удельном расходе воды 25 л/м². При скорости заготовки 1 м/с и давлении в системе 21 МПа полного удаления не получается даже при высоте установки сопел 75 мм. Гарантированная очистка может быть обеспечена при высоте установки сопел 50 мм, что практически невыполнимо, и системном давлении 30 МПа. При высоте установки сопел 100 мм и выше системное давление должно быть значительно увеличено, в то же время на упомянутых сталях, как правило, остается слой остаточной окалины, который не может быть удален даже в ходе второго пропуса через гидросбив.

Представленные на рис. 1 характеристики аппроксимируются уравнением прямой в отрезках на осях, которое в нашем случае будет иметь вид

$$\frac{P_{yd}}{P_{yd\max}} + \frac{Q_{yd}}{Q_{yd\max}} = 1,$$

где P_{yd}, Q_{yd} – искомые параметры струи гидросбива, $P_{yd\max}, Q_{yd\max}$ – константы, характерные для конкретной марки стали.

Для гарантированного удаления окалины на данной марке стали, согласно этому уравнению, при некотором заданном значении расхода воды Q_{yd} и скорости сляба v_{cl} необходимое значение удельного удара определяется условием

$$P_{yd} \leq P_{yd\max} \left(1 - \frac{Q_{yd}}{Q_{yd\max}} \right). \quad (9)$$

Связь давления удара с площадью следа струи на поверхности стали и с высотой установки сопла осуществляется зависимостью (3) и формулой (13).

В табл. 1 приведены химический состав сталей, соответствующих представленным на рис. 1 характеристикам, а также константы уравнения (9) $P_{yd\max}, Q_{yd\max}$ для этих сталей.

Таблица 1 – Химический состав сталей, соответствующих рис. 1

Обозначение стали	Химический состав									Константы уравнения (9)	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	$P_{yd\max}$	$Q_{yd\max}$
0,04%C	0,04	0,02	0,36	0,008	0,019	0,06	0,01	0,04	0,11	0,2	130
0,15%C	0,15	0,28	0,57	0,017	0,020	0,11	0,03	0,12	0,02	0,15	80
SiMn	0,59	1,81	0,86	0,014	0,014	0,20	0,02	0,10	0,02	1,8	135
0,5%NiCrMo	0,18	0,22	0,83	0,012	0,015	0,56	0,22	0,65	0,024	0,3	45
3%NiCr	0,14	0,25	0,54	0,011	0,030	0,85	0,03	3,24	0,04	0,5	160

Необходимый для качественной очистки сляба удельный объем воды $Q_{yd}^{зад}$ является функцией количества окалины $w_{ок}$, образовавшейся при нагреве,

$$Q_{y\partial}^{zad} = Q_{y\partial}^{zad}(w_{ок}).$$

В свою очередь, эта величина является функцией конкретных условий нагрева металла в печи и химсостава стали. В простейшем случае она определяется формулой (6). В общем виде $w_{ок}$ представляет собой сложную функцию с векторным аргументом

$$w_{ок} = w_{ок}(\tau, O_2, T, C, Si, Cr, Ni),$$

где τ – время нагрева заготовки, O_2 – содержание кислорода в атмосфере печи, T – температура сляба на выходе из печи, C, Si, Cr, Ni – процентное содержание углерода, кремния, хрома и никеля в стали.

В связи с отсутствием в настоящее время аналитических связей между этими переменными, вышеупомянутые зависимости могут быть представлены в виде регрессионного полинома:

$$Q_{y\partial}^{zad} = Q_{y\partial}^{zad}(w_{ок}) = q_0 + \sum_1^k q_i x_i + \sum_{i < j}^k q_{ij} x_i x_j + \sum_1^k q_{ii} x_i^2, \quad (10)$$

где q_0, q_i, q_{ij}, q_{ii} – коэффициенты регрессии, $x_i, x_j, (i, j = 1 \dots k)$ – аргументы полинома $x = (\tau, O_2, T, C, Si, Cr, Ni)$.

Коэффициенты регрессии определяются с применением известных статистических методов планирования эксперимента [9].

Уравнения (9) и (10) позволяют в первом приближении задать удельный расход и давление удара (удельную силу удара) на слябе данного типоразмера и марки стали. Для круглого неподвижного сопла, расположенного на расстоянии (высоте) h от поверхности и под углом β относительно нормали к поверхности сляба (угол атаки), полная сила удара определяется согласно выражению [10]

$$F_{y\partial} = \rho Q v \cos \beta = \rho s_{cn} v^2 \cos \beta = 2 \mu^2 s_{cn} P \cos \beta, \quad (11)$$

где ρ – плотность жидкости, μ – коэффициент расхода сопла, s_{cn} – выходное сечение сопла, v – скорость струи на выходе из сопла, P – давление жидкости на входе в сопло.

Из последнего выражения с учетом (3) определяется необходимое рабочее давление в системе:

$$P = \frac{F_{y\partial} S}{2 \mu^2 s_{cn} \cos \beta}. \quad (12)$$

Здесь площадь следа струи сопла на поверхности сляба вычисляется по формуле (рис. 2)

$$S = \pi h^2 \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right)} \right)^2, \quad (13)$$

где α – угол расхождения струи на выходе сопла.

Полное значение расхода воды всей установкой гидросбива определяется из зависимости

Рисунок 2 – К определению площади следа сопла на поверхности сляба

$$Q_{полн} = nQ_{сн},$$

где n – полное количество сопел, $Q_{сн}$ – см. формулу (4). Из этого выражения определяется необходимое количество работающих насосов:

$$n_{нас} = \frac{Q_{полн}}{Q_{нас}},$$

где $Q_{нас}$ – номинальная производительность одного насоса.

Из выражения (5) определяется необходимая скорость сляба в камере гидросбива:

$$v_{сл} = \frac{nQ_{сн}}{Q_{уд}B_{сл}}. \quad (14)$$

Величина поверхностных теплотерь в камере гидросбива согласно выражению (8)

должна удовлетворять условию

$$\Delta t_{нов} = \frac{k_m Q_{полн} (T_{сг} - T_{вд})}{v_{сл} H_{сл}} \leq \Delta t_{нов}^{доп}. \quad (15)$$

В случае превышения теплотерь по сравнению с этим неравенством осуществляется корректировка либо расхода воды, либо скорости сляба.

Для гидросбива с неподвижными соплами выражения (9)–(15) позволяют определить все вышеупомянутые технологические параметры настройки системы.

В устройстве гидросбива, оборудованном вращающимися центробежными роторными головками, сопла расположены на горизонтальных подводящих трубках и, кроме угла атаки β , предназначенного для подрыва и смыва окарины с плоскости металла, повернуты относительно вертикальной оси головки на угол разгона γ , обеспечивающий создание реактивного вращающего момента (рис. 3). Рабочая (очищающая) составляющая струи формируется проекцией вектора абсолютной скорости струи на плоскость атаки ПА. При этом выражение для силы удара (11) приобретает вид

$$F_{уд}^{пот} = \rho Q v \cos \beta \cos \varepsilon = \rho Q v_p, \quad (16)$$

где v – абсолютная скорость струи относительно сляба, v_p – проекция абсолютной скорости на плоскость атаки ПА, ε – угол между v и v_p .

С другой стороны, необходимый удельный расход жидкости, определяемый для неподвижных сопел по формуле (5) в случае вращающихся сопел $Q_{уд}^{пот}$, следует обеспечить на дуге поверхности сляба соплами, расположенными на роторной головке,

$$Q_{уд}^{пот} = \frac{Q}{b_{сн} \omega_z R_z}, \quad (17)$$

где $b_{сн}$ – ширина следа струи вращающегося сопла на поверхности сляба, R_z – средний радиус следа струи при вращении головки, $R_z = R_{конст} + h \tan \beta$, $R_{конст}$ – конструктивный радиус головки, ω_z – угловая скорость вращения головки.

Искомая скорость движения сляба при работе гидрослива на роторных головках определяется из сравнения уравнений (5) и (17) при условии $B = 2R_z$ (рис. 4).

Рисунок 3 – Кинематическая схема скоростей жидкости для вращающейся центробежной роторной головки

Рисунок 4 – К определению удельного расхода жидкости при роторном гидросливе

$$v_{cl} = \frac{1}{2} b_{cl} \omega_z. \quad (18)$$

Таким образом, в случае гидрослива с вращающимися центробежными роторными головками сила удара и скорость сляба определяются по формулам (16) и (18), учитывающим эффект вращения канала с жидкостью.

Входящая в (18) угловая скорость ω_z определяется из уравнения с момента количества движения для вращающегося сопла [10]:

$$M_{\kappa\delta} = -\rho Q_{cn} R_z v_{zu}, \quad (19)$$

где Q_{cn} – расход жидкости на сопло, v_{zu} – окружная составляющая абсолютной скорости жидкости v на выходе из сопла в плоскости вращения ПВ (рис. 3).

Согласно кинематической схеме скоростей роторной головки (рис. 3), в плоскости вращения ПВ имеет место векторное соотношение:

$$\overline{v_z} = \overline{w_z} + \overline{u_z}, \quad (20)$$

где v_z – вектор проекции абсолютной скорости струи v на плоскость вращения, (горизонтальная составляющая v), $\overline{w_z}$ – вектор проекции относительной скорости струи w на плоскость вращения (горизонтальная составляющая w), $\overline{u_z}$ – окружная скорость сопла.

Из схемы скоростей в плоскости ПВ содержащаяся в уравнении (19) окружная составляющая v_{zu} равна

$$v_{zu} = u_z - w_z \cos \psi = \omega_z R_z - w_z \cos \psi. \quad (21)$$

Из (19) и (21) получаем

$$M_{\kappa\delta} = \rho Q_{cn} R_z (w_z \cos \psi - w_z R_z). \quad (22)$$

Здесь значение расхода определяется из выражения

$$Q_{cn} = \mu s_{cn} w_z. \quad (23)$$

Входящая в (21) и (23) горизонтальная составляющая относительной скорости w_z определяется из уравнения Бернулли для сечений на входе и выходе вращающегося канала, в нашем случае – в коллекторе и на выходе вращающегося сопла:

$$\frac{w_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} - \frac{\omega_1^2 r^2}{2} = \frac{w_z^2}{2} + \frac{P_z}{\rho} - \frac{\omega_z^2 R_z^2}{2}, \quad (24)$$

где w_1, w_z – проекции относительной скорости струи на входе и выходе из сопла на плоскость вращения, ω_1, ω_z – угловая скорость струи на входе и выходе канала, то есть на входе в трубку и на выходном срезе сопла, r, R_z – радиус вращательного движения в контрольных сечениях – на входе в трубку и на срезе сопла, P_1, P_z – давление жидкости на входе в трубку и на выходе из сопла.

В рассматриваемом случае

$$w_1 = 0, \omega_1 = 0, P_1 = P_z = P \sin \delta, P_2 = 0,$$

где P_z – горизонтальная составляющая вектора давления жидкости в сопле в плоскости вращения ПВ,

$$\delta = \arctg \sqrt{tg^2 \beta + tg^2 \gamma}.$$

В результате уравнение (24) принимает вид

$$2P_z = \rho w_z^2 - \rho \omega_z^2 R_z^2, \quad (25)$$

откуда получается выражение для проекции относительной скорости струи

$$w_z = \sqrt{\frac{2P_z}{\rho} + \omega_z^2 R_z^2}. \quad (26)$$

Подстановка (26) в (22) и (23) приводит к следующему выражению для момента количества движения:

$$M_{\kappa\delta} = \rho \mu s_{cn} R_z \left[\left(\frac{2P_z}{\rho} + \omega_z^2 R_z^2 \right) \cos \psi - w_z R_z \sqrt{\frac{2P_z}{\rho} + \omega_z^2 R_z^2} \right]. \quad (27)$$

Согласно общему уравнению моментов вращающейся системы,

$$M_{\kappa\delta} = M_c. \quad (28)$$

Входящий сюда момент сопротивления M_c

$$M_c = M_{ms} + M_{nd}, \quad (29)$$

где M_{ms} – момент трения трубки с соплом о воздух, M_{nd} – момент трения в подшипниках роторной головки.

Момент трения о воздух может быть рассчитан с применением формулы для силы лобового сопротивления, возникающей при обтекании цилиндрических тел (подводящей трубки головки и сопла) потоком воздуха [11]:

$$F_{m6} = \frac{1}{2} C_x \rho_6 S_{mp} u^2, \quad (30)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления, S_{mp} – площадь продольного сечения трубки, $S_{mp} = l_{mp} d_{mp}$; l_{mp}, d_{mp} – длина и диаметр трубки, ρ_6 – плотность воздуха, u – скорость потока.

Момент трения для элемента трубки роторной головки Δl_{mp} (или для элемента радиуса Δr) будет равен

$$m_{m6} = F_{m6} r = C_x \rho_6 \Delta l_{mp} d_{mp} u^2 r = C_x \rho_6 \Delta r d_{mp} r^3 \omega_z^2, \quad (31)$$

где d_{mp} – диаметр трубки, r – текущий радиус соответствующего элемента Δr , u_z – линейная скорость этого элемента.

Коэффициент лобового сопротивления C_x зависит от числа Рейнольдса. Для цилиндрической трубки

$$Re = \frac{d_{mp}}{\nu} u_z, \quad (32)$$

где ν – вязкость воздуха при температуре в камере гидросбива. В нашем случае C_x является степенной функцией скорости потока с показателем $p \approx -1$.

$$C_x = k_{cx} \left(\frac{d_{mp}}{\nu} u \right)^{-p} \approx k_{cx} \frac{\nu}{u_z d_{mp}} = k_{cx} \frac{\nu}{\omega_z r d_{mp}}, \quad (33)$$

где k_{cx} – коэффициент при степенной функции.

Тогда момент сопротивления на элементарной длине горизонтальной части трубки будет равен

$$m_{m6z} = k_{cx} \nu \rho_6 r^2 \Delta r \omega_z. \quad (34)$$

Полный момент сопротивления трения горизонтальной части вращающейся трубки

$$M_{m6z} = \int_0^{R_z} (m_{m6z}) dr = k_{cx} \nu \rho_6 \omega_z \int_0^{R_z} r^2 dr = \frac{1}{3} k_{cx} \nu \rho_6 \omega_z R_z^3. \quad (35)$$

Вертикальная часть головки, образуемая соплом длиной l_c , повернутым под углом атаки в сторону сляба, создает момент сопротивления

$$M_{m6c} = k_{cx} \rho_6 \nu l_c R_z^2 \omega_z. \quad (36)$$

Суммарный момент сопротивления трения о воздух равен

$$M_{m6} = M_{m6z} + M_{m6c} = \frac{1}{3} k_{cx} \rho_6 \nu R_z^2 (R_z + 3l_c) \omega_z. \quad (37)$$

Момент трения в опорных подшипниках вычисляется по формуле [12]

$$M_{nd} = 0,05 F_g d_{ncp}, \quad (38)$$

где F_g – вертикальная составляющая реакции в подшипниках, d_{ncp} – средний диаметр подшипника.

С учетом (27), (37) и (38) уравнение моментов (28) принимает вид

$$\rho \mu s_{cn} R_z \left[\left(\frac{2P}{\rho} + \omega_z^2 R_z^2 \right) \cos \psi - \omega_z R_z \sqrt{\frac{2P}{\rho} + \omega_z^2 R_z^2} \right] = \frac{1}{3} k_{cx} \rho_6 v R_z^2 (R_z + 3l_c) \omega_z + 0,05 F_6 d_{ncp}. \quad (39)$$

Пренебрегая моментом в подшипниках, простыми преобразованиями (возведение в квадрат, приведение подобных) это уравнение приводится к биквадратному уравнению относительно угловой скорости вращения ω_z типа

$$a\omega_z^4 + b\omega_z^2 = c,$$

имеющему известные формулы для корней

$$\omega_{z1,2,3,4} = \pm \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}}.$$

Решение этого уравнения дает значение угловой скорости вращения роторной головки ω_z и окружной скорости сопла u_z , а по формуле (18) вычисляется необходимая скорость сляба в камере гидросбива.

Из схемы скоростей на рис. 4, согласно уравнению (20), определяется значение горизонтальной проекции абсолютной скорости v_z , модуль которого равен

$$v_z = \sqrt{u_z^2 + w_z^2 - 2u_z w_z \cos(u_z \wedge w_z)}. \quad (40)$$

Искомая абсолютная скорость струи вращающейся головки v определяется из соотношения

$$v = \frac{v_z}{\cos \varphi},$$

где $\varphi = \arctg \frac{h}{v_z}$. По выражениям (16) и (3) с учетом последнего соотношения определяют фактические значения силы полного F_{y0} и удельного P_{y0} ударов на поверхности сляба. В случае отклонения значения удельного удара от необходимого по зависимостям (3), (9), (13) осуществляется корректировка либо высоты установки сопла h , либо давления жидкости в системе P .

Описанные выше принципы расчета параметров настройки реализованы в АС ГСО, которая предназначена для контроля и управления технологическим процессом очистки от окалины поверхностей горячих заготовок (слябов) после нагрева в методических печах стана 2800 [13].

Система обеспечивает получение высококачественной поверхности листов после прокатки горячих заготовок (слябов) в черновой клети стана 2800 при минимизации трудовых, материальных и энергетических затрат. Минимизация материальных затрат обеспечивается за счет увеличения выхода кондиционной продукции и снижения расхода материалов, энергоносителей и т.п. [14]. Техничко-экономические показатели эффективности АС ГСО приведены на рис. 5.

Расчетный годовой экономический эффект - **3...4 млн. грн.**

Рисунок 5 – Показатели эффективности

Рисунок 6 – Комплекс технических средств АС ГСО

Комплекс технических средств АС ГСО включает как оборудование водоструйное высокого давления (ОВВД), так и технические средства сбора технологической информации, измерения параметров и управления (рис. 6).

Рисунок 7 – Двухуровневая система управления процессом гидросбива окалины на стане 2800

На рис. 7 представлена структурная схема двухуровневой системы с распределенными функциями, предназначенная для управления процессом гидросбива окалины на стане 2800 [15]. На нижнем уровне применен IBM PC-совместимый программируемый контроллер, обеспечивающий сбор и обработку технологической информации от первичных преобразователей (датчиков), расположенных как на технологической линии стана, так и на входящих в состав ОВВД, расчет и выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы, а также обмен информацией с промышленным компьютером верхнего уровня и пультом оператора. Этот компьютер

обеспечивает обмен информацией с системой управления тепловым режимом печей и контроллером нижнего уровня, частично выполняет расчет управляющих воздействий, решает задачи накопления, обработки и архивирования статистических данных.

ОВВД включает в себя [13]:

- насосную станцию высокого давления (ВД);
- устройство пневматического управления насосной станцией;
- магистраль высокого давления;
- верхний и нижний коллекторы с пятью сопловыми роторными головками на каждом (рис. 8);
- фильтры высокого и низкого давления.

Включение – выключение насосов осуществляется в моменты времени, определяемые алгоритмом управления, по сигналам от программируемого контроллера.

ОВВД имеет следующие технические характеристики:

- количество агрегатов насосных ВД – 5 (один резервный);
- номинальная производительность одного насоса – 100 л/мин ($6 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- мощность приводного электродвигателя одного агрегата – 132 кВт;
- общая мощность – 660 кВт;
- наибольшее рабочее давление коллекторов 60 МПа;
- наибольший расход воды на каждый коллектор – 200 л/мин ($12 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- расстояние от сопел головок до поверхности слябов – 100–200 мм.

Роторные головки системы на стане 2800 приводятся во вращение реактивным моментом рабочей струи. Головка формирует водяной конус из струй воды с частотой вращения около 1000 об/мин, обрабатывающих полосу сляба шириной около 300 мм. Пять головок каждого из двух коллекторов обеспечивают сплошную очистку сляба на верхней и

нижней поверхностях. Конструктивно роторная головка выполнена в виде пары ось – втулка; на оси установлен корпус с удлинителями, на концах которых под углом к оси расположены сменные сопла с круглыми рабочими отверстиями диаметром 1–2 мм. Со стороны оси, прикрепленной накладной гайкой к соответствующему патрубку коллектора, имеется канал подвода воды, соединенный через отверстия в корпусе с каналами удлинителей и сопел. Сопла расположены на горизонтальных подводящих трубах, крепятся к удлинителям накладными гайками и, кроме угла атаки, предназначенного для подрыва и смыва окалины с плоскости металла, повернуты относительно вертикальной оси головки на угол разгона, обеспечивающий создание реактивного вращающего момента. Пара ось-втулка образует радиальный и упорный гидродшипники. Угол атаки составляет около 15° , что соответствует принятым углам атаки действующих устройств гидросбива на прокатных станах.

Рисунок 8 – Схема устройства гидросбива окалины

Верхний коллектор смонтирован на подвижной раме – траверсе, при этом расстояние от среза сопел до обрабатываемой поверхности сляба устанавливается автоматически в зависимости от толщины сляба. С помощью регуляторов – байпасов осуществляется также автоматическое регулирование рабочего давления в системе в зависимости от марки стали и режима печного нагрева.

Промышленный компьютер верхнего уровня комплектуется монитором и стандартной клавиатурой, а контроллер нижнего уровня связан с оператором с помощью специального пульта, оборудованного жидкокристаллическим дисплеем и набором необходимых органов управления. Архивирование информации ведется на компакт-дисках, для чего промышленный компьютер верхнего уровня комплектуется пишущим приводом CD-RW. В дальнейшем эта информация может быть пересмотрена и распечатана на любом ПК, имеющем привод CD.

Источниками технологической информации для системы являются датчики, установленные на линии стана 2800 на участке гидросбива, датчики давления воды и положение верхней траверсы ОБВД.

В состав комплекта датчиков технологической информации входят фотореле, вихревые датчики наличия металла, датчик давления воды, пирометр, датчик импульсов и датчики интегральной яркости, которые служат для косвенной оценки плотности и коли-

чества окалина на поверхности сляба, что вышел из печи. Выходной сигнал датчиков интегральной яркости вместе с данными о марке стали служит для расчета давления воды и скорости перемещения сляба в камере гидросбива.

АС ГСО реализует следующие функции:

1) двунаправленный обмен данными с АСУ ТП печей по стандартному сетевому интерфейсу:

- прием информации о слябе, который вышел из печи на прокатку, от АСУ ТП печей;

- передача массива измеренных температур в АСУ ТП печей для корректировки режима нагрева;

2) наблюдение за движением слябов от печей через камеру гидросбива к пирометру;

3) расчет режимов управления гидросбивом:

- положение верхней траверсы с коллектором камеры гидросбива;

- давление гидросбива;

- скорость продвижения металла через камеру гидросбива к пирометру;

4) управление гидросбивом в соответствии с рассчитанными управляющими воздействиями:

- установка расчетного давления гидросбива;

- установка верхней траверсы в заданное положение (позиционирование);

- управление скоростью рольганга;

- управление подачей воды;

5) коррекция режима гидросбива по заданию оператора;

6) определение температуры поверхности сляба и ее распределение по длине сляба;

7) корректировка библиотеки управляющих воздействий гидросбива по данным измерения температуры поверхности сляба;

8) архивирование и протоколирование работы системы.

Функциональная структура АС ГСО приведена на рис. 9.

Алгоритм системы функционирует в циклическом режиме, то есть в каждом цикле производится анализ необходимости выполнения каждой ветви алгоритма, и если такая необходимость существует, то соответствующий алгоритм запускается в работу. В общем алгоритм функционирования АС ГСО можно представить состоящим из трех частей: расчетной, управляющей и статистической. Алгоритмы определения ситуаций, в том числе аварийных и нестандартных, входят в управляющую часть главного алгоритма и реализуются по мере слежения за продвижением сляба и хода технологического процесса.

Расчетная часть алгоритма начинает действовать с момента поступления информации от АСУ ТП печей и продолжает работать по мере прохождения сляба по технологической линии. По коду марки стали определяется вязкость окалина, на основании которой выбирается одно из трех давлений гидросбива, а также скорость прохождения сляба под камерой гидросбива. Эти уставки корректируются в зависимости от температуры нагрева сляба в печи. Если металл «перележал» в печи, что означает большую плотность окалина, то требуется увеличить давление гидросбива или уменьшить скорость прохождения сляба под гидросбивом, либо то и другое одновременно. По толщине сляба выбирается положение верхней траверсы камеры гидросбива. Интегральная яркость металла необходима для оценки качества работы гидросбива. Эти данные используются для расчета уставок на следующий сляб, а также для записи в массив уставок.

Рисунок 9 – Функциональная структура АС ГСО

3. Выводы

Проведен анализ физических процессов гидроочистки окалины. Рассмотрены принципы расчета параметров устройства гидросбива окалины с роторными головками. Показано, что эффективность удаления окалины существенно связана с маркой стали, а также со скоростью жидкости на выходе вращающихся роторных головок. Проанализированы некоторые математические модели расчета удара и расхода воды. Представленные в статье технические решения, включающие новую высокоэффективную энерго- и ресурсосберегающую технологию гидроочистки поверхности металла, технические средства высокого давления воды, математические зависимости и характеристики использованы в автоматизированной системе гидросбива окалины (АС ГСО), которая внедрена в промышленную эксплуатацию на стане 2800. Эта разработка может быть внедрена практически на всех металлургических комбинатах Украины и стран ближнего зарубежья.

Экономическая эффективность АС ГСО достигается за счет повышения качества проката, экономии расхода электроэнергии, воды, топлива при нагреве металла в печах, экономии угара металла в печах, а также ресурсосбережения.

Применение АС ГСО в значительной степени способствует ресурсосбережению за счет увеличения срока службы агрегатов и исполнительных механизмов. Этот фактор, а также простота обслуживания, высокая надежность автоматизированной системы и способность работы в тяжелых условиях обеспечат снижение затрат на ремонт гидравлического и электрического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кролль А. Гидромеханическое удаление окалины на широкополосных станах горячей прокатки. *Черные металлы*. 2000. № 3. С. 48–52.
2. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Чистопьянов О.Ф., Корбут В.Б. Физические принципы гидравлического удаления печной окалины на стане горячей прокатки. *Интернет-издание «Metaljournal»*. 2014. Май. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/some-problems-of-energy-and-resource-saving-and-modern-technologies-of-hydraulic-scale>.
3. Шевченко Т.Г. Системи керування прокатним устаткуванням з використанням енергоресурсозберігаючих технологій: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2004. URL: <http://dissertation.com.ua/node/654996>.
4. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Корбут В.Б. Принципы алгоритмической реализации автоматизированной системы гидросбива окалины. Результаты промышленного внедрения. *Автоматизация производственных процессов*. 2006. № 1 (22). С.65–68.
5. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Чистопьянов О.Ф., Корбут В.Б. Теоретический анализ механизмов разрушения окалины при гидросбиве. *Интернет-издание «Metaljournal»*. 2014. Июнь. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/theoretical-study-of-devices-for-scale-hydraulic-fragmentation-on-hot-rolling-mill/>.
6. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Чистопьянов О.Ф., Корбут В.Б. Принципы расчета параметров настройки АСУ гидросбивом окалины с центробежными роторными головками. *Интернет-издание «Metaljournal»*. 2014. Май. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/design-principals-of-settings-of-ACS-by-water-descaling-with-cerebrifugal-rotatory>.
7. Silk N.J. The practical aspects of hydraulic de-scaling. *Steel Times Int.* 2001. N 7. P. 38.
8. Sheridan A.T., Simon P. Descaling of Steels in Rolling Mills. *European Steel-making Developments & Perspectives in Rolling & Reheating*: conf. (Luxembourg, 1–2 nd Feb. 1995). Luxembourg, 1995. 224 p.
9. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 338 с.
10. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1978. 454 с.
11. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1978. 582 с.
12. Краткий технический справочник. М.: Наука, 1952. 531 с.
13. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Чистопьянов О.Ф., Корбут В.Б. Некоторые проблемы энергоресурсосбережения и современные энергоресурсосберегающие технологии гидравлического удаления окалины на станах горячей прокатки. *Интернет-издание «Metaljournal»*. 2014. Май. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/some-problems-of-energy-and-resource-saving-and-modern-technologies-of-hydraulic-scale>.
14. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Евдоксин А.В., Корбут В.Б. Энергосбережение в системах гидросбива окалины на станах горячей прокатки. *Промышленная электроэнергетика и электротехника*. 2005. № 4. С. 59–63.
15. Іевлев М.Г., Корбут В.Б. Енергозберігаюча автоматизована система гідрозбивання окалини для стана гарячої прокатки. *Науково-технічна інформація*. 2012. № 1 (51). С. 44–48.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2020