

DOI: 10.18721/JEST.240209
УДК 669.02/09

А.Н. Шичков, Н.А. Бормосов, В.П. Белоусова

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СТАЛИ

Актуальность исследований определяется необходимостью использовать управленческий учёт при организации производства и принятии инновационных решений по совершенствованию потребительских свойств слябов в машинах непрерывного литья заготовок. Цель исследования – разработка технических инструментов для реализации системы адаптивного управления управленческим учётом в зоне вторичного охлаждения. Решалась задача проектирования конструкции и технологии изготовления распылителей (форсунок) на основе порошковой металлургии, обеспечивающих необходимое диспергирование охлаждающей жидкости. В качестве метода использованы натурные и лабораторные исследования, позволившие принять обоснованные решения. Комплект форсунок был продан предприятию. Адаптивный метод управленческого учёта в производственно-технологических системах используется как базовый. В дальнейшем исследования будут направлены на использование полученных результатов в технологических системах других индустрий.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, зона вторичного охлаждения, управленческий учёт, потребительские свойства слябов, порошковая металлургия, распылители жидкости.

Ссылка при цитировании:

А.Н. Шичков, Н.А. Бормосов, В.П. Белоусова. Управление вторичным охлаждением машин непрерывного литья стали // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 104–118. DOI: 10.18721/JEST.240209.

A.N. Shichkov, N.A. Bormosov, V.P. Belousova

Vologda State University, Vologda, Russia

THE MANAGEMENT BY SECONDARY COOLING THE MACHINES CONTINUOUS CASTING OF STEEL

The study subject is relevant because the management accounting approach has to be introduced to organization of production, allowing to make innovative decisions for improving the consumer properties of steel slabs in continuous casting machines. The goal of the study is to develop the technical tools for implementing an adaptive control system for management accounting in the zone of the secondary cooling system. The task of the study is to design a construction and manufacturing technology for spray guns (nozzles) based on powder metallurgy, ensuring the necessary dispersion of the liquid. Full-scale and laboratory-scale experimental investigations were used as a method allowing to make informed decisions. A set of

nozzles has been sold to an enterprise. The adaptive method of control in manufacturing-technological systems is used as the basic one in management accounting. Further studies will be directed to use these results in technologies of others industries.

Keywords: machine continuous casting of steel, zone of secondary cooling, management accounting, consumer properties of slab, powder metallurgy, spray gun (nozzles).

Citation:

A.N. Shichkov, N.A. Bormosov, V.P. Belousova, The management by secondary cooling the machines continuous casting of steel, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(02)(2018) 104–118, DOI: 10.18721/JEST.240209.

Введение

Потребительские свойства горячекатаной листовой стали стана 2000 Череповецкого металлургического комбината («Северсталь»), определяющие их рыночную стоимость, зависят от потребительских свойств слэбов, полученных в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), являющихся технологическим переделом и одновременно зоной финансовой ответственности. Анализ организации производства в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ показал, что отсутствие системы управленческого учёта технологических затрат и потребительских свойств формирующегося слитка не позволяет принимать аргументированные технологические решения, обеспечивающие управление рыночной стоимостью слитка. Дело в том, что управленческий учёт – необходимый инструмент для совершенствования рыночного уклада между переделами как зонами финансовой ответственности; на этой основе реализуется система инновационного совершенствования организации производства в зоне вторичного охлаждения.

Под управленческим учётом в производственно-технологической системе МНЛЗ мы понимаем организацию производства в денежном эквиваленте, обеспечивающую снижение технологических затрат за счет получения поверхности слитка, которая не требует его охлаждения для огневой зачистки поверхности и сокращает время разогрева в печах под горячую прокатку. Максимальное использование тепла разлива расширяет возможности вплоть до совмещения разлива и горячей прокатки. Система управленческого учёта является интеллектуальной собственностью пред-

приятия и, как правило, патентуется в форме полезной модели [1].

Существенным фактором при реализации этой задачи является система вторичного капельного испарительного охлаждения слитка от кристаллизатора до резки металла. Наши исследования с использованием расчётных управляющих моделей испарительного капельного охлаждения показали, что оно малоэффективно и требует применения в системах вторичного охлаждения МНЛЗ дорогостоящих нормированных распылителей (фирмы Лехлер и др.), при этом необходимо использовать весьма затратные системы водоподготовки. Нами разработаны конструкция и технология изготовления распылителей на основе порошковой металлургии, которые в сочетании с информацией об интенсивности вторичного разогрева слитка обеспечивают систему адаптивного управления формированием потребительских свойств слэба с требуемой рыночной стоимостью [2–6]. В качестве управляющего воздействия на интенсивность вторичного охлаждения слитка каплями диспергированной жидкости использован установленный в процессе исследований эффект вторичного разогрева поверхности слэба перед резкой [7, 8].

Организация системы управленческого учёта в зоне вторичного охлаждения обеспечивает требуемое распределение температуры по длине кристаллизующегося непрерывнолитого слэба, исключаящее образование дефектов. При отсутствии требуемой организации охлаждения возможно раскрытие дефектов, образовавшихся в кристаллизаторе (продольные, поперечные, сетчатые и паукообразные трещины), по-

явление новых дефектов (холодные трещины), возникающих уже в зоне вторичного охлаждения [9–12].

Инновационные решения по управлению равномерностью охлаждения и стабилизацией характеристик применяемых распылителей охлаждающей жидкости (форсунок) заключаются в усовершенствовании технологии их изготовления, а также разработке методов оперативного контроля их теплотехнических характеристик [13, 14].

Цель исследований – разработать технические средства управленческого учёта в производственно-технологической системе зоны вторичного охлаждения МНЛЗ на основе адаптивного управления капельным испарительным охлаждением, которые бы обеспечили слябу потребительские свойства, имеющие требуемую рыночную стоимость.

Материал и методика работы

В основе работы лежат экспериментальные исследования на специально спроектированном и изготовленном стенде [2].

Основные зависимости получены в результате анализа капельного охлаждения высокотемпературной поверхности и экспериментального исследования рассеянного света в водяных диспергируемых системах.

При оценке изменения интенсивности рассеянного света на каплях жидкости, диспергируемых плоско-факельной форсункой, использовался видеокomпьютерный анализ с последующим преобразованием снимаемого видеоизображения.

Измерения дисперсности потока и скорости движения капель произведены высокоскоростной видеосъемкой и дальнейшей ее обработкой методами математической статистики.

Экспериментальные исследования

Совершенствование технологии изготовления распылителей. Распылители (форсунок) предназначены для зоны вторичного охлаждения в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), которая играет важную роль в процессе формирования структуры

стальных заготовок. Форсунки системы водяного и водо-воздушного охлаждения слитка МНЛЗ традиционно изготавливаются из цветных сплавов посредством технологий обработки резанием. Вместе с тем от стабильности параметров гидродинамических характеристик распылителей зависит эффективность охлаждения поверхности слитка. Любые отклонения этих параметров осложняют процесс расчета охлаждения слитка, разработку и использование алгоритмов управления и эксплуатации систем вторичного охлаждения. Перспективным решением в данном случае может быть разработка ресурсосберегающей технологии изготовления распылителей методом порошковой металлургии [15]. Анализ номенклатуры продукции, при изготовлении которой применяется широкий спектр методов и технологий порошковой металлургии, позволил убедиться в ее разнообразии по назначению, форме, массе и конструктивной сложности. Повышение эксплуатационных свойств спеченных изделий достигается как оптимизацией химического состава шихты, так и посредством освоения инновационных инженерных решений в области совершенствования важнейших операций технологического процесса порошковой металлургии – прессования и спекания.

К основным преимуществам технологии порошковой металлургии относят:

- снижение операционных затрат на последующую механическую обработку лезвийным или абразивным инструментом;

- получение готовых изделий с высокой точностью по размерам;

- обеспечение требуемых параметров качества (шероховатости) поверхности изделия;

- уменьшение количества операций в технологической цепи изготовления продукта;

- использование более чем 97 % порошковых материалов, в том числе полученных из вторичных ресурсов;

- реализацию многих сборочных этапов ещё на стадии спекания;

получение изделий с уникальными свойствами за счет использования многокомпонентных смесей, объединяющих металлические и неметаллические компоненты;

получение более высоких потребительских свойств, технических и эксплуатационных характеристик изделий по сравнению с традиционными технологиями [13].

В настоящее время на предприятиях черной металлургии широко используются плоскофакельные распылители. Пример конструкции представлен на рис. 1. Распылители данной конструкции зарекомендовали себя как обладающие достаточно высокими эксплуатационными характеристиками: устойчивостью факела, низкой засоряемостью сопла.

Ввиду конструктивной сложности распылителей процесс их изготовления сложен и трудоемок, а коэффициент использования материала не превышает 0,5. Кроме того, при механической обработке достаточно крупных партий имеет место непостоянство размеров выходных сопел распылителей [13].

Представленная конструкция распылителя была принята в качестве исходной для разработки технологии их изготовления методом порошковой металлургии, что обеспечивает повышение стабильности гидродинамических характеристик распылителей как в пределах партии изделий, так и при длительной эксплуатации в условиях коррозионных и эрозионных воздействий.

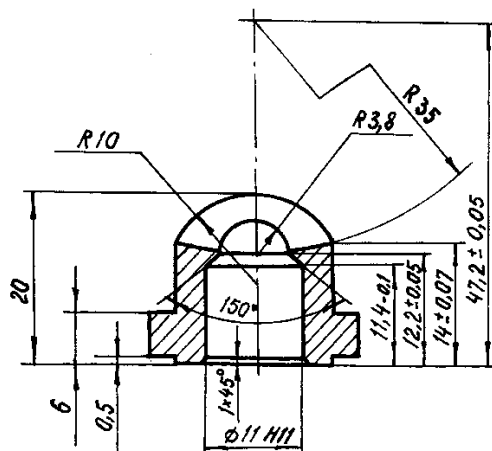


Рис. 1. Плоско-факельный водяной распылитель
Fig. 1. The flat-torch water nozzle

Технология изготовления распылителей методом порошковой металлургии обеспечивает минимальный разброс размерных характеристик сопел. Сочетание оптимальных режимных параметров технологических процессов подготовки шихты, холодного формования и вакуумного спекания позволяет получить высокую размерную стабильность сопел. В пределах крупных партий достигается снижение до 3–5 % разброса гидродинамических характеристик.

Изготовление методом порошковой металлургии распылителя данной конструкции представляет собой весьма сложную задачу. Сущность процесса прессования заключается в деформировании некоторого объема сыпучего порошкового тела. Объем порошкового тела, в отличие от компактного, изменяется в результате смещения отдельных частиц, заполняющих пустоты между ними и за счет деформации частиц.

Для формообразования заготовок из порошков необходима установка, создающая силовое воздействие на порошок (механический, гидравлический пресс или специальное устройство), и пресс-оснастка, обеспечивающая придание заготовке требуемой формы, размеров, плотности (пресс-форма).

По общепринятой классификации все детали, изготавливаемые методом порошковой металлургии, подразделяют на 7 групп по сложности конфигурации. Рассматриваемое изделие, имеющее сквозное осевое отверстие с переходом цилиндрической части в полусферу и далее в шель, а также наружную поверхность сложной конфигурации, может быть отнесено только к высшей группе сложности, которая описывается следующим образом: «детали с отверстиями, имеющие несколько наружных и внутренних переходов по высоте, и детали, ограниченные непараллельными плоскостями и криволинейными поверхностями».

Прессование плоскофакельного распылителя в пресс-форме традиционного конструктивного исполнения с формообразующими элементами — матрицей, пуансоном и выталкивателем — не представляется возможным по следующим причинам: пресующий пуансон будет иметь весьма тонкую стенку, что не обеспечит его достаточной

прочности и длительной эксплуатации пресс-формы; по окончании процесса прессования и отводе вверх прессующего пуансона существует вероятность разрушения прессовки за счёт отрыва её верхней части (головка), так как последняя будет плотно сидеть в кольцевой полости пуансона.

В связи с обозначенной проблемой была разработана конструкция пресс-формы для изготовления низконапорного плоскофакельного водяного распылителя (форсунка) со следующими параметрами геометрии: площадь выходного отверстия составляет $19,5 \text{ мм}^2$, фронтальный угол раскрытия факела в рабочем режиме $- 140^\circ$, боковой угол $- 3^\circ$.

Предлагаемая пресс-форма не имеет матрицы. Конструкция пресс-формы представлена на рис. 2, где 1 – скользящее кольцо; 2 и 3 – пружинные элементы; 4 – разрезной верхний пуансон; 5 – прессуемая форсунка; 6 – неподвижное кольцо; 7 – пластина.

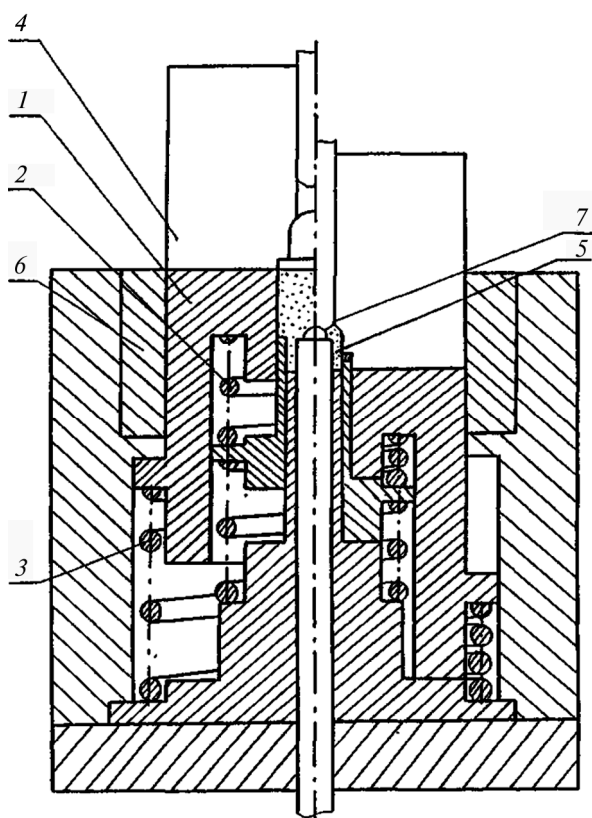


Рис. 2. Пресс-форма для прессования плоскофакельных распылителей
Fig. 2. Press mold for pressing the flat-torch water nozzle

Оригинальное конструкторское решение защищено патентом РФ №2021880. Пресс-форма изготовлена при авторском надзоре. Наличие в пресс-форме пружинных элементов обеспечивает выполнение условия равноплотности в различных сечениях изделия. При выталкивании изделие 5 вместе с верхним пуансоном 4 выходит из зоны неподвижного кольца 6, разрезные части пуансона 4 расходятся и деталь свободно извлекается из него.

Важным достоинством пресс-формы является ее легкая переналадка. Это касается, в первую очередь, пластины и неподвижного знака. Пластина формирует щелевой паз распылителя. При конструктивном изменении пластины, в частности ее толщины и угла заострения, соответственно изменяются и параметры щелевого паза форсунки. При конструктивном изменении неподвижного знака, который, как и пластина, легко заменяем в пресс-форме, соответственно изменяются размеры и геометрия внутренней полости форсунки.

Таким образом, достаточно легкая переналадка пресс-формы за счет замены пластины и неподвижного знака обеспечивает возможность изготовления форсунок с различными гидродинамическими характеристиками распылителей.

Маршрутный технологический процесс изготовления форсунок методом порошковой металлургии (холодное прессование в жесткой пресс-форме) представлен в таблице.

Технологический процесс подготовки шихты при изготовлении плоскофакельных распылителей методом порошковой металлургии включает отжиг, просев и смешивание исходных порошковых компонентов.

Отжиг порошков производился в вакууме $0,4 \text{ Па}$, просев – с помощью стандартных сит с ячейками 250 и 63 мкм . Смешивание порошковых компонентов производилось в смесителе барабанного типа, оснащенного ребрами, установленными в его полости под углом $20-25^\circ$ к образующей. Формование (прессование) плоскофакельных распылителей осуществлялось в специально разработанной пресс-форме, которая устанавливалась на гидравлическом прессе марки ОКС 1671М.

Маршрутный технологический процесс изготовления деталей методом порошковой металлургии

Route technological process of manufacturing details by a method of powder metallurgy

Номер этапа	Наименование операции	Особенности, режимы, контролируемые параметры
1	Подготовка шихты	Просев, довосстановление, отжиг, размол, смешивание, сушка и др.
2	Контроль шихты	Гранулометрический состав, насыпная плотность
3	Прессование	Способ прессования, схема, давление
4	Контроль прессовок	Состояние кромок, трещины, плотность
5	Спекание	Защитная среда, температура, время
6	Контроль	Усадка, трещины, коробление, окисление

Усилие прессования составляло 400 МПа, так как при больших давлениях происходит растрескивание материала в переуплотненных зонах изделия. Спекание производилось в электропечи СНВ-1.3.116И1 в вакууме 0,4 Па. С целью максимального использования объема рабочего пространства и допускаемой массы разовой загрузки для размещения в печи спекаемых изделий были разработаны и изготовлены многоярусные подставки, что позволяет спекать за один цикл до 360 распылителей. Температуру и продолжительность процесса спекания выбирали в зависимости от материала. В качестве материала использован сплав СПХ13Д2, обладающий необходимыми для предстоящих условий эксплуатации характеристиками жаропрочности и коррозионной стойкости [13].

Экспериментальные исследования характеристик распылителей. Исследования гидродинамических и теплообменных характеристик низконапорной плоскофакельной форсунки, изготовленной в лаборатории ВоГУ методом порошковой металлургии, проводились на экспериментальном стенде по разработанной методике [2]. На рис. 3 показан факел жидкости, распыляемой плоско-факельной форсункой.

Сравнительное исследование капельного спектра форсунки, полученной методом порошковой металлургии, и аналогичной форсунки фирмы LENCLEER (Германия), изготовленной механической прецизионной обработкой, показало, что качество диспергирования жидкости разработанными соплами вполне соответствует необходимым требованиям (рис. 4).

На рис. 5 показаны экспериментальные зависимости от давления P_f перед форсункой, характеризующие основные технологические параметры работы плоскофакельной форсунки: a – расход жидкости G_f ; b – квадрат среднеповерхностного радиуса диспергированной капли (тонина распыла) R_{02}^2 ; v – плотность орошения факела g_f ; ε – коэффициент теплоотдачи α_f . Расстояние h_f от среза сопла до поверхности изменялось в пределах от 0,1 до 0,45 м.

Экспресс-анализ распылителей. Исходя из представленных выше результатов экспериментальных исследований сделан вывод, что интенсивность охлаждения высокотемпературных поверхностей факелом распыленной жидкости зависит от плотности орошения и степени диспергированности жидкости.

Плотность орошения в любом месте факела форсунки можно определить обычными методами (например, с помощью мензурок). Сложнее определить диспергированность. Метод фотографирования летящих капель с дальнейшей обработкой полученных фотографий очень трудоемок и требует определенного времени, поэтому его нельзя использовать для оперативного контроля (экспресс-анализа) диспергирующих свойств форсунок. Более удобным и гораздо менее трудоемким является способ, основанный на измерении интенсивности рассеянного света при прохождении луча лазера через факел форсунки. В работе [2] было показано, что интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна площади поверхности распыленной жидкости, а значит, эту площадь можно рассматривать как обобщенный параметр диспергированности.

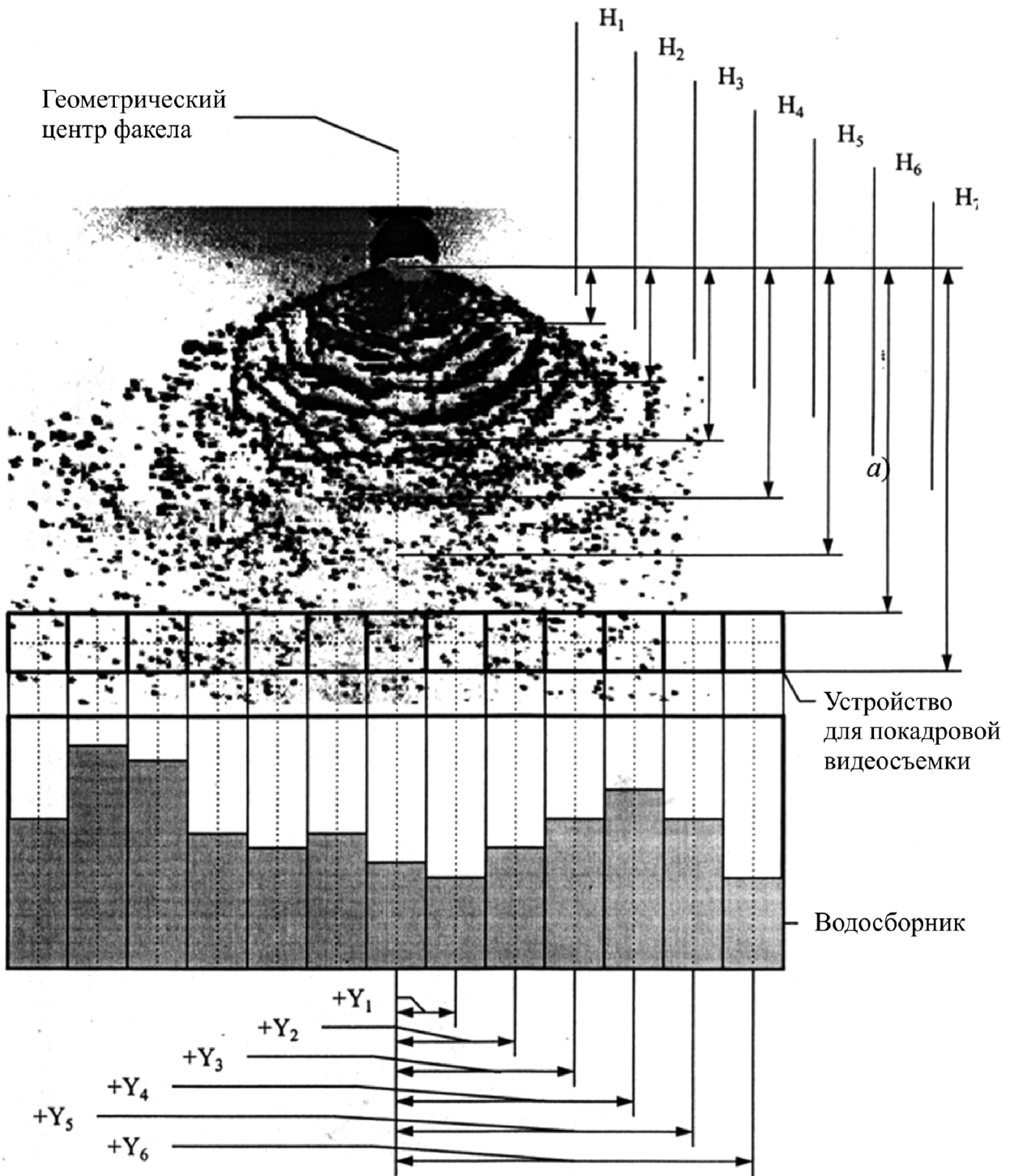


Рис. 3. Факел распыляемой жидкости
Fig. 3. The torch of sprayed water

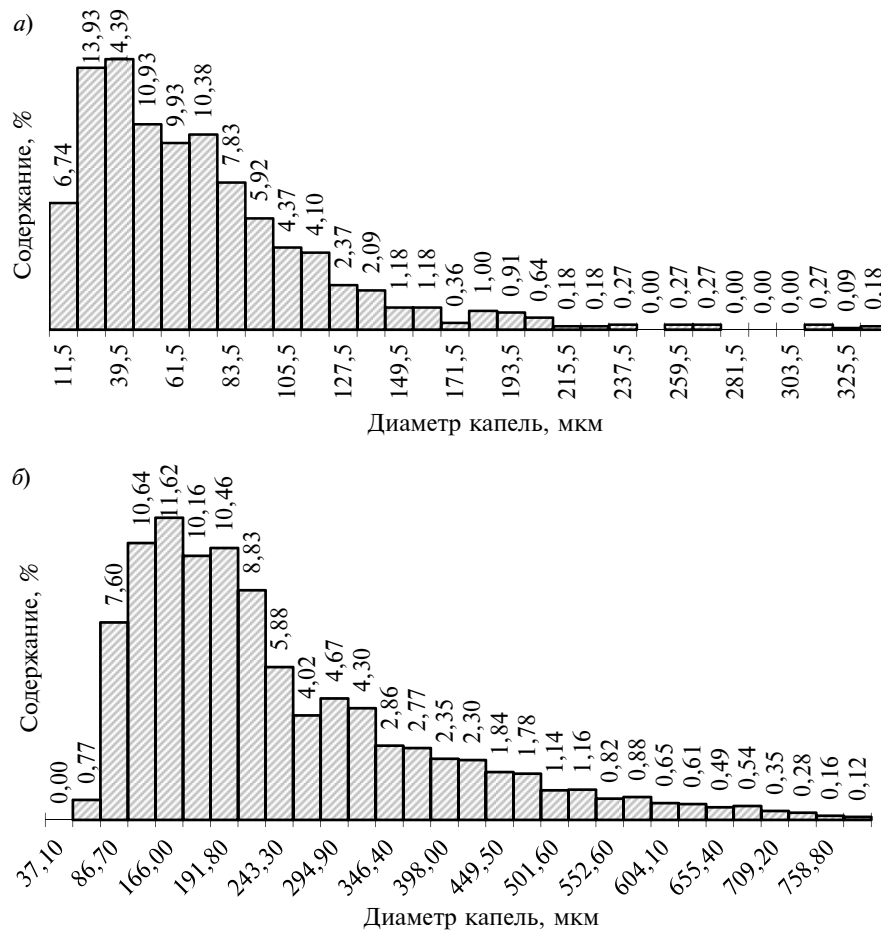


Рис. 4. Распределение капель по размерам в поперечном сечении форсунки: *а* – форсунка фирмы LECHLER с водовоздушным охлаждением; *б* – форсунка ВоГУ, изготовленная методом порошковой металлургии с водяным охлаждением

Fig. 4. The size distribution of droplets in the cross section of the torch: *a* – the nozzle of LECHLER firm (water-air cooling); *b* – the nozzle of VSU, manufactured by method powder metallurgical for cooling by water

Для того чтобы использовать метод экспресс-анализа диспергирующих свойств форсунок, для определения обобщенного параметра диспергированности в различных местах факела распыленной жидкости, требуется произвести настройку и тарировку измерительной системы, описание которой дано в работе [2]. При тарировке определяется коэффициент пропорциональности между амплитудой сигнала, который пропорционален интенсивности рассеянного света в данном месте факела, и обобщенным параметром диспергированности в том же месте факела. Если приемник рассеянного света находится достаточно далеко от факела, этот коэффициент пропорциональности практически не зависит от угла рас-

сеяния и для всех участков факела будет одинаковым. Если приемник рассеянного света расположен вблизи от факела, то коэффициент пропорциональности зависит от угла рассеяния. При расположении приемника рассеянного света на одной высоте с лучом лазера и направлении его перпендикулярно плоскости факела плоскофакельной форсунки (в этом случае луч лазера проходит в плоскости факела перпендикулярно основной оси факела, которую можно условно считать вертикальной) коэффициент пропорциональности будет зависеть только от угла θ , где угол θ равен углу между направлением луча лазера и направлением от локального участка факела к приемнику рассеянного света.

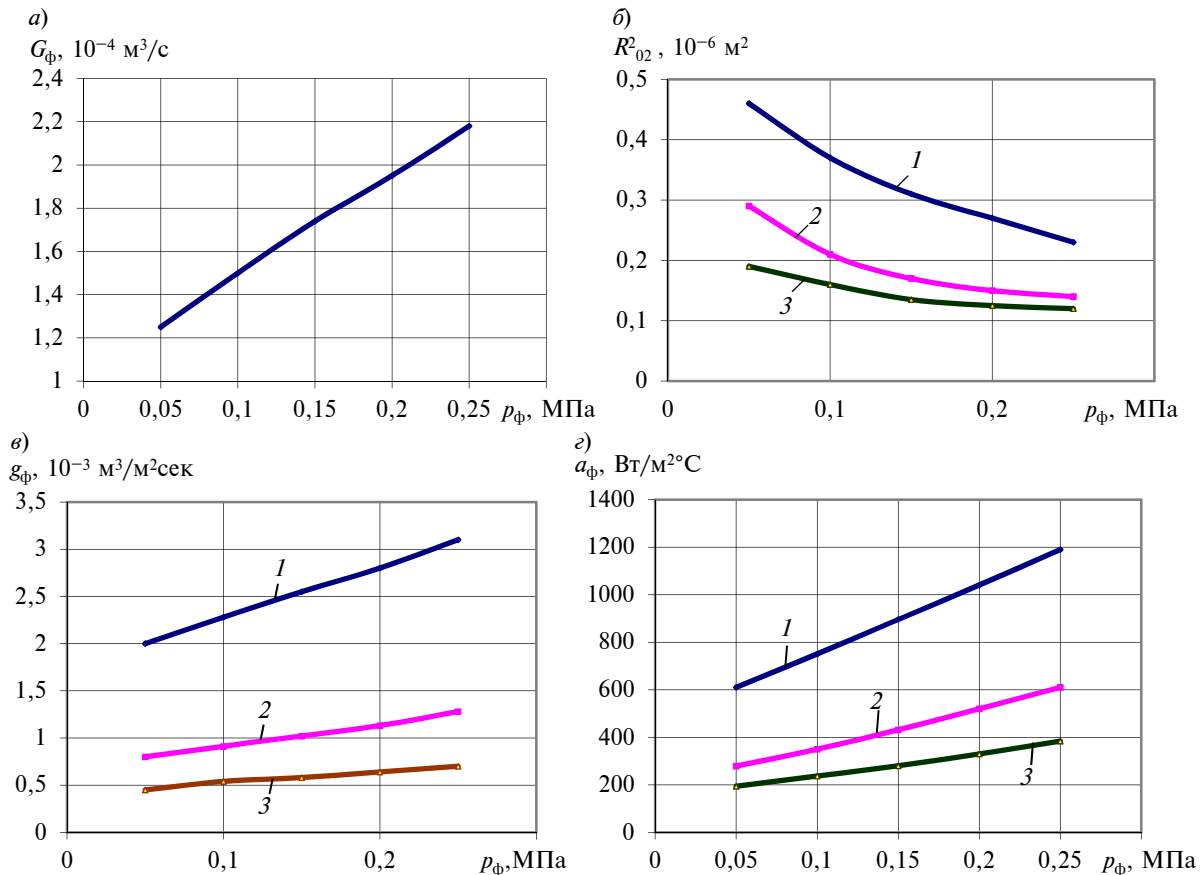


Рис. 5. Экспериментальные исследования гидродинамических и теплообменных характеристик форсунок (при h_ϕ – 255 (1), 350 (2) и 450 (3) мм)

Fig. 5. Experimental study of the hydrodynamic and head-exchange characteristics of water nozzles (for h_ϕ – 255 (1), 350 (2), 450 (3) mm)

Тарировку системы и настройку следует производить с помощью форсунки, диспергирующие свойства которой исследованы независимым способом, например изложенным в работе [2]. Так, несмещенное изображение летящих капель можно получить, используя режим высокоскоростного затвора видеоустройства при видеосъемке с экспозицией кадра $1,25 \cdot 10^{-4}$ сек. После того как для тарировочной плоско-факельной форсунки в локальных участках факела на одной и той же высоте определен обобщенный параметр диспергированности капель

$$D = N_{02}^2, \quad (1)$$

строится зависимость $D(\theta)$. После этого на той же высоте факела пропускается луч лазера и производится съемка рассеянного

света. Амплитуда сигнала рассеянного света, полученного при компьютерной обработке, также будет зависеть от угла θ : $A(\theta)$. Следующий шаг – расчет тарировочного коэффициента k :

$$k(\theta) = \frac{D(\theta)}{A(\theta)}. \quad (2)$$

Очевидно, что тарировочный коэффициент $k(\theta)$ будет зависеть от расстояния между факелом и приемником света, от чувствительности приемника света, а также от компьютерной программы, обрабатывающей видеосигнал.

После оценки тарировочного коэффициента применяется метод экспресс-анализа для определения обобщенного параметра диспергированности в любом месте факела произвольной форсунки, подле-

жашей исследованию. Важно при этом сохранять геометрию расположения приемника света, луча лазера и плоскости факела. Луч лазера следует перемещать в плоскости факела, соответственно должен перемещаться и приемник света, иначе тарировочный коэффициент изменится. В экспресс-методе факел опытной плоско-факельной форсунки, подлежащей исследованию, просвечивается лучом лазера. Приемник света воспринимает свет, рассеянный каплями жидкости, преобразует его в электрические сигналы, которые изображаются в виде распределения амплитуды сигнала рассеянного света. Амплитуда характеризуется углом рассеяния θ . Далее рассчитывается обобщенный параметр диспергированности в зависимости от угла рассеяния:

$$D(\theta) = k(\theta)A(\theta). \quad (3)$$

Зная геометрию расположения приемника и факела, легко определить локальный участок факела, соответствующий углу θ .

В качестве примера рассмотрим, как производится тарировка на конкретной форсунке. Приемник света располагался на расстоянии 2 м от плоскости факела. Ширина факела в месте просвечивания лучом лазера составляла 1,6 м. Таким образом, факел из приемника света был виден под углом 20° , а угол рассеяния θ изменялся в пределах от 80 до 100° .

На рис. 6, а показано распределение обобщенного параметра диспергированности D по ширине факела, полученное способом, изложенным в работе [2]. На рис. 6, б – распределение амплитуды сигнала рассеянного света по ширине факела, полученное при просвечивании факела на том же уровне лучом лазера. На рис. 6, в – тарировочный коэффициент, равный отношению D к A .

То, что коэффициент k периодически изменяется по ширине факела, объясняется погрешностью эксперимента, поэтому производится его сглаживание. Средний тарировочный коэффициент в данном случае составляет $0,022 \text{ м}^2\text{-един}/\text{м}^3$ и практи-

чески не зависит от угла рассеяния. Вместо угла рассеяния используется значение расстояния до оси факела.

Для оценки коэффициента теплоотдачи на охлаждаемой поверхности можно использовать формулу

$$\alpha = \psi_{\text{эм}} NR_{02}^2 \omega_{\text{кп}} = \psi_{\text{эм}} D \omega_{\text{кп}}, \quad (4)$$

где $\omega_{\text{кп}}$ – нормальная составляющая средней скорости каплей, попадающих на поверхность; $\psi_{\text{эм}}$ – эмпирический коэффициент пропорциональности, $5,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Данная формула является эмпирической; ее вывод основан на том, что интенсивность теплообмена распыленной жидкости с высокотемпературной поверхностью должна быть пропорциональна площади поверхности жидкости, взаимодействующей в единицу времени с высокотемпературной поверхностью.

Таким образом, кроме обобщенного параметра диспергированности, для определения α нужно знать скорость, с которой капли попадают на поверхность.

Скорость движения капли в факеле распыленной жидкости можно определить по длине трека методом скоростной видеосъемки с экспозицией кадра $3,33 \cdot 10^{-4}$ сек. Поскольку этот способ трудоемкий, то скорость полета каплей можно определить по формуле

$$\omega_{\text{к}} \approx \frac{G_{\text{ф}}}{F_{\text{ф}}}, \quad (5)$$

где $G_{\text{ф}}$ – объемный расход жидкости через форсунку, $\text{м}^3/\text{с}$; $F_{\text{ф}}$ – площадь выходного отверстия форсунки, м^2 .

Если β_a – угол, под которым падают капли на поверхность, то нормальная составляющая скорости капли определяется так:

$$\omega_{\text{кп}} = \omega_{\text{к}} \sin \beta_a. \quad (6)$$

Угол β_a легко определяется экспериментально.

Таким образом, используя изложенный метод экспресс-анализа, можно оперативно оценивать теплотехнические характеристики плоскофакельных форсунок.

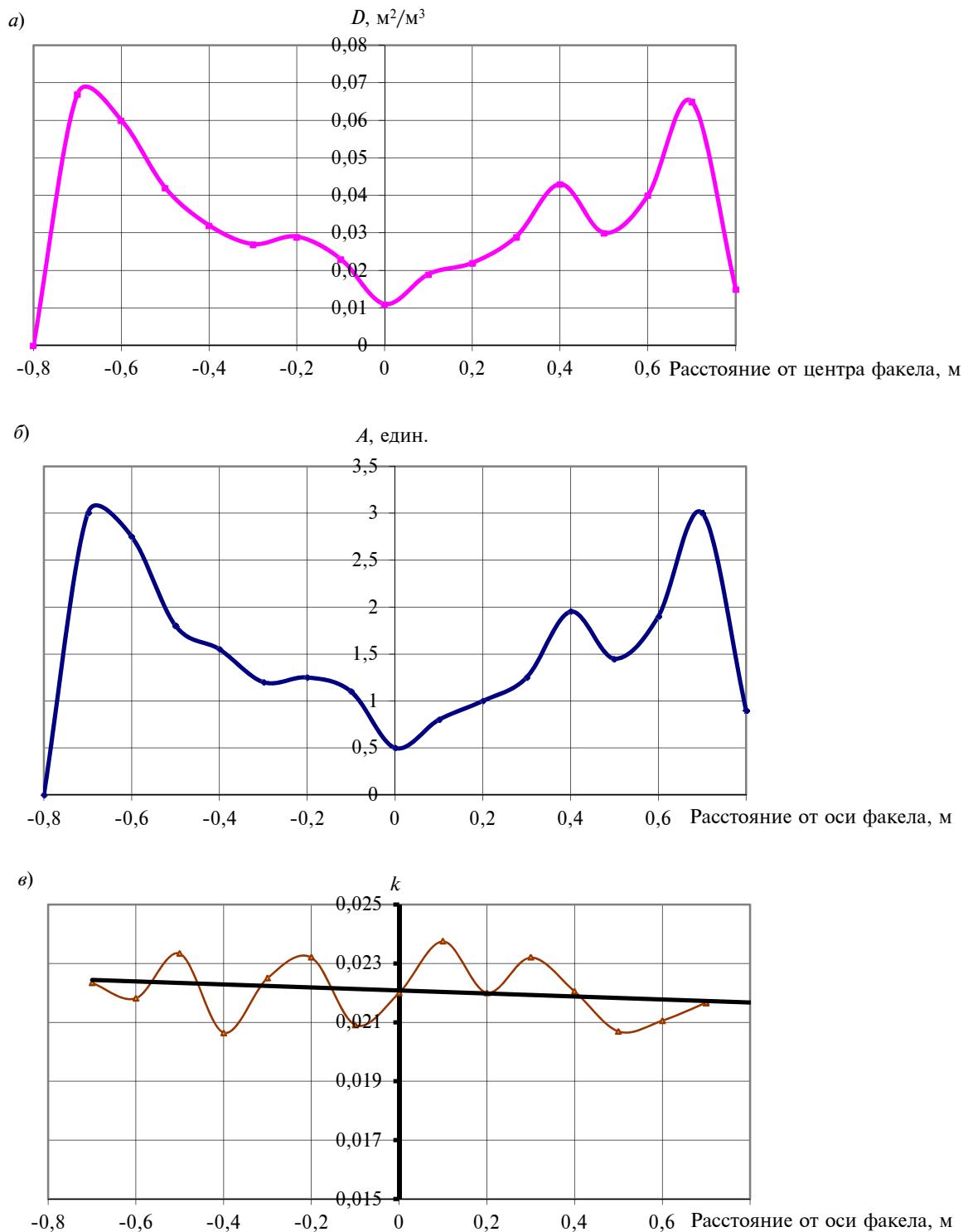


Рис. 6. Параметры системы охлаждения: *a* – распределение обобщенного параметра диспергирования жидкости по ширине факела; *b* – распределение амплитуды сигнала рассеянного света по ширине факела; *v* – тарировочный коэффициент
 Fig. 6. The parameters of cooling system: *a* – the distribution of the combined parameter of dispersion of the liquid across the width of the torch; *b* – the distribution of the signal amplitude of the scattered light across the width of the torch; *v* – calibration factor

Обсуждение результатов

Анализ исследования применения форсуночного водяного и водо-воздушного охлаждения и организация на их основе рационального режима вторичного охлаждения позволяет улучшить качество поверхности непрерывнолитых слябов. Так, количество слябов с продольными трещинами из низколегированной и углеродистой сталей снижается соответственно на 5 и 0,3 %; протяженность трещин уменьшается на 70–90 мм при снижении глубины их залегания в 2–4 раза. Это, в свою очередь, способствует увеличению выхода годного листового проката на 1,3–8,6 % в зависимости от марки стали, что во многих случаях позволяет полностью отказаться от зачистки слябов в потоке на машине огневой зачистки. Во всех случаях форсуночное охлаждение позволяет получить более высокую степень диспергирования потока, а как следствие, более равномерное распределение коэффициента теплоотдачи по поперечному сечению факела и эффективное охлаждение поверхности слитка, что приводит к повышению качества получаемого на МНЛЗ металла.

Широкая номенклатура разливаемых на МНЛЗ марок сталей требует разработки различных систем и режимов вторичного охлаждения, что ведет к разнообразию типоразмеров используемых распыливающих устройств. Анализ оборудования, применяемого при испытаниях того или иного типа форсунок, показывает: такие исследования требуют длительного времени и большого объема измерений с последующей их обработкой для получения гидродинамических и теплотехнических характеристик форсунок, что не позволяет проводить оперативную работу по корректировке характеристик для получения требуемых режимов охлаждения, а также унификацию и стандартизацию конструктивных параметров форсунок с целью снижения количества применяемых типоразмеров. Требуется автоматизация вычислительных операций на базе современной компьютерной техники и цифровых техно-

логий с применением программ обработки получаемых данных или сигналов, например по рассеянию света, проходящего через факел диспергированной форсункой жидкости.

Выводы

1. Разработана конструкция и технология изготовления методом порошковой металлургии распылителей (форсунок) воды для зоны вторичного охлаждения машин непрерывного литья стальных слябов. Отличительная особенность предложенной технологии заключается в обеспечении идентичности и стабильности гидравлических характеристик каждой форсунки. Распылители, изготовленные технологиями резания и литьём под давлением, не обладают этими преимуществами. Конструкция форсунок и пресс-форма для изготовления признаны изобретениями. Комплект форсунок на одну МНЛЗ, изготовленный в лаборатории Вологодского государственного университета, прошёл опытно-промышленные испытания на МНЛЗ Череповецкого металлургического комбината.

2. Установленный в результате натурных исследований эффект вторичного разогрева поверхности сляба за зоной вторичного охлаждения и полученные гидравлические характеристики форсунок стали исходными этапами при создании системы адаптивного управления вторичным охлаждением МНЛЗ.

3. Конструкция пресс-формы для изготовления плоскофакельной форсунки технологична с точки зрения быстрой переналадки и обеспечивает возможность изготовления форсунок с требуемыми параметрами факела.

4. Разработан метод оперативного экспресс-анализа теплообменных характеристик плоскофакельных форсунок.

Полученные результаты будут использованы для метрологического обеспечения в процессе совершенствования систем управленческого учёта в производственно-технологической системе непрерывной разливки стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шичков А.Н., Кремлева Н.А., Шичков А.Н. Проектирование операционного цикла конверсии производственного капитала в денежный капитал в инженерном бизнесе // Экономика и менеджмент в условиях цифровизации: состояние, проблемы, форсайт: труды научно-практической конференции с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 483–511.
2. Калягин Ю.А., Бормосов Н.А., Лукин С.В. Тепловые процессы в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Череповец: ЧГУ, 2005. 168 с.
3. Калягин Ю.А., Лукин С.В., Синицын А.А. Разработка энерго эффективного управления технологическим процессом охлаждения и затвердевания непрерывного литого сляба // Metallurg. 2013. № 12. С. 53–57.
4. Kalyagin Yu.A., Lukin S.V., Sinitsyn A.A. Development of energy efficient management of production process for continuously cast slab cooling and solidification // Metallurgist. 2014. Vol. 57. Is. 11. P. 1100–1105.
5. Лукин С.В., Поселожный Д.В. Исследование вторичного охлаждения в слябовой машине непрерывного литья заготовок // Вестник Череповецкого государственного университета. 2011. № 1. С. 86–90.
6. Лукин С.В., Поселожный Д.В., Кибардин А.Н. Расчет теплопередачи от поверхности сляба в зоне вторичного охлаждения криволинейной машины непрерывного литья заготовок // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч. 3. Череповец: Изд-во ЧГУ, 2013. С. 156–157.
7. Шестаков Н.И., Калягин Ю.А., Лукин С.В. О расчете температурного поля непрерывного слитка при известной интенсивности охлаждения // Металлы. 2003. № 5. С. 22–25.
8. Лукин С.В., Баширов Н.Г., Гофман А.В. Исследование охлаждения сляба в зоне вторичного охлаждения криволинейной машины непрерывного литья заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 1. С. 50–54.
9. Калягин Ю.А., Лукин С.В., Образцов М.А. Исследование теплообмена в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2008. № 2. С. 66–67.
10. By Qing Liu, Xiaofeng Zhang, Bin Wang, Bao Wang. Chapter 6. Control Technology of Solidification and Cooling in the Process of Continuous Casting of Steel. 2012. URL: <https://www.intechopen.com/books/science-and-technology-of-casting-processes/control-technology-of-solidification-and-cooling-in-the-process-of-continuous-casting-of-steel> (дата обращения: 10.04.2013).
11. Кибардин А.Н., Мухин В.В., Антонова Ю.В. Оптимальные режимы охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ-прокатный стан» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 6 (75). С. 16–20.
12. Лукин С.В., Кочкин А.А., Кибардин А.Н., Антонова Ю.В., Мухин В.В., Игонин В.И. Алгоритмы оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ-нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 2 (77). С. 23–30.
13. Белоусова В.П. Формирование факторов экологизации экономического развития промышленного предприятия // Инновации. 2009. № 1. С. 26–29.
14. Kolczyk E., Miczkowski Z., Czernecki J. Numerical investigation of heat exchange in rotary furnace. 2017. URL: <https://www.degruyter.com/view/j/amm.2017.62.issue1/amm-2017-0020/amm-2017-0020.xml> (дата обращения: 20.12.2017).
15. Angelo P.C. Micro and Nano Fabrication by Powder Metallurgy // Journal of Powder Metallurgy & Mining. 2015. URL: http://www.iitg.ernet.in/engfac/ganu/public_html/Powdermetallurgy.pdf (дата обращения: 10.09.2016).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШИЧКОВ Александр Николаевич — доктор экономических наук заведующий кафедрой Вологодского государственного университета
 E-mail: shichkov-an@yandex.ru
БОРМОСОВ Николай Александрович — кандидат технических наук доцент Вологодского государственного университета
 E-mail: bormosovna@mh.vstu.edu.ru

БЕЛОУСОВА Виктория Павловна – кандидат технических наук доцент Вологодского государственного университета
E-mail: belousova.v2011@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 20.03.2018

REFERENCES

- [1] **Shichkov A.N., Kremleva N.A., Shichkov A.N.**, Projektirovaniye operatsionnogo tsikla konversii proizvodstvennogo kapitala v denezhnyy kapital v inzhenernom biznese [Designing operation cycle converting a manufacturing capital into monetary capital in engineering busin], *Ekonomika i menedzhment v usloviyakh tsifrovizatsii: sostoyaniye, problemy, forsayt: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2017. S. 483–511. (rus.)
- [2] **Kalyagin Yu.A., Bormosov N.A., Lukin S.V.**, Teplovyye protsessy v zone vtorichnogo okhlazhdeniya mashiny nepreryvnogo litya zagotovok [Heat processes in zones secondary cooling the machine of continues casting steel]. Cherepovets: Izd-vo ChGU, 2005. 168 s. (rus.)
- [3] **Kalyagin Yu.A., Lukin S.V., Sinitsyn A.A.**, Razrabotka energo effektivnogo upravleniya tekhnologicheskim protsessom okhlazhdeniya i zatverdevaniya nepreryvnogo litogo slyaba [Development of energy efficient process control of cooling and solidification of continuous cast slab], *Metallurg*. 2013. № 12. S. 53–57. (rus.)
- [4] **Kalyagin Yu.A., Lukin S.V., Sinitsyn A.A.**, Development of energy efficient management of production process for continuously cast slab cooling and solidification, *Metallurgist*. 2014. Vol. 57. Is. 11. P. 1100–1105. (rus.)
- [5] **Lukin S.V., Poselyuzhnyy D.V.**, Issledovaniye vtorichnogo okhlazhdeniya v slyabovoy mashine nepreryvnogo litya zagotovok [Study of secondary cooling in slab continuous casting machine billet], *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. № 1. S. 86–90. (rus.)
- [6] **Lukin S.V., Poselyuzhnyy D.V., Kibardin A.N.**, Raschet teploperedachi ot poverkhnosti slyaba v zone vtorichnogo okhlazhdeniya krivolineynoy mashiny nepreryvnogo litya zagotovok [Calculation of heat transfer from the slab surface in the zone of secondary cooling of curved continuous casting machine], *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ch. 3. Cherepovets: ChGU*, 2013. S. 156–157. (rus.)
- [7] **Shestakov N.I., Kalyagin Yu.A., Lukin S.V.**, O raschete temperaturnogo polya nepreryvnogo slitka pri izvestnoy intensivnosti okhlazhdeniya [On the calculation of the temperature field of a continuous slab with the known intensity of cooling], *Metally*. 2003. № 5. S. 22–25. (rus.)
- [8] **Lukin S.V., Bashirov N.G., Gofman A.V.**, Issledovaniye okhlazhdeniya slyaba v zone vtorichnogo okhlazhdeniya krivolineynoy mashiny nepreryvnogo litya zagotovok [Research of slab cooling in the zone of secondary cooling of curved continuous casting machine], *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2010. № 1. S. 50–54. (rus.)
- [9] **Kalyagin Yu.A., Lukin S.V., Obratsov M.A.**, Issledovaniye teploobmena v zone vtorichnogo okhlazhdeniya mashiny nepreryvnogo litya zagotovok [Research of heat exchange in the zone of secondary cooling of the continuous casting machine], *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii (kuznechno-shtampovochnoye, liteynoye i drugiye proizvodstva)*. 2008. № 2. S. 66–67. (rus.)
- [10] **By Qing Liu, Xiaofeng Zhang, Bin Wang, Bao Wang**, Chapter 6. Control Technology of Solidification and Cooling in the Process of Continuous Casting of Steel. 2012. URL: <https://www.intechopen.com/books/science-and-technology-of-casting-processes/control-technology-of-solidification-and-cooling-in-the-process-of-continuous-casting-of-steel> (data obrashcheniya: 10.04.2013). (rus.)
- [11] **Kibardin A.N., Mukhin V.V., Antonova Yu.V.**, Optimalnyye rezhimy okhlazhdeniya, termostirovaniya i nagreva slyabov na linii «MNLZ-prokatnyy stan» [Optimal modes of cooling, temperature control and heating of the slabs on the line «CCM-rolling mill»], *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. № 6 (75). S. 16–20. (rus.)
- [12] **Lukin S.V., Kochkin A.A., Kibardin A.N., Antonova Yu.V., Mukhin V.V., Igonin V.I.**, Algoritmy optimizatsii rezhimov okhlazhdeniya, termostirovaniya i nagreva slyabov na linii «MNLZ-nagrevatel'naya pech» [Algorithms to optimize cooling, temperature control and heating of the slabs on the line «CCM-heating furnace»],

Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. № 2 (77). S. 23–30. (rus.)

[13] **Belousova V.P.**, Formirovaniye faktorov ekologizatsii ekonomicheskogo razvitiya promyshlennogo predpriyatiya [Formation of factors of colorization of economic development of the industrial enterprise], *Innovatsii.* 2009. № 1. S. 26–29. (rus.)

[14] **Kolczyk E., Miczkowski Z., Czernecki J.**, Numerical investigation of heat exchange in

rotary furnace. 2017. URL: <https://www.degruyter.com/view/j/amm.2017.62.issue1/amm-2017-0020/amm-2017-0020.xml> (data obrashcheniya: 20.12.2017).

[15] **Angelo P.C.**, Micro and Nano Fabrication by Powder Metallurgy, *Journal of Powder Metallurgy & Mining.* 2015. URL: http://www.iitg.ernet.in/engfac/ganu/public_html/Powdermetallurgy.pdf. (data obrashcheniya: 10.09.2016).

THE AUTHORS

SHICHKOV Aleksandr N. – *Vologda State University*

E-mail: shichkov-an@yandex.ru

BORMOSOV Nikolai A. – *Vologda State University*

E-mail: bormosovna@mh.vstu.edu.ru

BELOUSOVA Viktoriia P. – *Vologda State University*

E-mail: belousova.v2011@mail.ru

Received: 20.03.2018