

© М.В. Майсурадзе, Ю.В. Юдин, Ю.Г. Эйсмонт, 2012 г.  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
г. Екатеринбург

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОКАПЕЛЬНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

*Рассмотрены принципы исследования гидравлических и теплотехнических характеристик центробежно-струйных форсунок, используемых в охлаждающих устройствах. Методом регрессионного анализа экспериментальных данных получены аналитические уравнения, связывающие конструктивные параметры водокапельных закалочных устройств с плотностью орошения и равномерностью ее распределения по охлаждаемой поверхности. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи исследованных форсунок от плотности орошения. Это позволяет по заданной жесткости охлаждения для детали из известной марки стали определить необходимую плотность орошения с целью получения требуемых структур и, вводя ограничения на равномерность плотности орошения, определить тип форсунки водокапельного охлаждения с оптимальными значениями конструктивных параметров.*

### **Аннотация**

Предложена методика расчетно-экспериментального определения оптимальных конструктивных параметров водокапельных охлаждающих устройств, используемых для термической обработки стальных изделий.

Рассмотрены принципы исследования гидравлических и теплотехнических характеристик центробежно-струйных форсунок, используемых в охлаждающих устройствах. Методом регрессионного анализа экспериментальных данных получены аналитические уравнения, связывающие конструктивные параметры водокапельных закалочных устройств с плотностью орошения и равномерностью ее распределения по охлаждаемой поверхности. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи исследованных форсунок от плотности орошения. Это позволяет по заданной жесткости охлаждения для детали из известной марки стали определить необходимую плотность орошения с целью получения требуемых структур, и, вводя ограничения на равномерность плотности орошения, определить тип форсунки водокапельного охлаждения с оптимальными значениями конструктивных параметров.

### **Введение**

Проблема разработки новых закалочных сред, позволяющих заменить традиционно применяемые воду и масло, наиболее актуальна при

производстве крупногабаритных изделий (валки прокатных станов, крупные молотовые штампы), а также при применении индукционного нагрева для термической обработки деталей. Данную проблему успешно позволяет решить использование в качестве охлаждающей среды водовоздушных и водокапельных смесей. Такие закалочные среды обладают рядом преимуществ: 1) появляется возможность регулирования интенсивности охлаждения при закалке; 2) можно осуществлять охлаждение как всей поверхности детали, так и ее части; 3) не требуется применения дорогостоящих охлаждающих сред, дополнительных систем охлаждения и пожаротушения; 4) данные среды являются экологически чистыми [1]. Исследования возможности использования водовоздушных закалочных сред для термической обработки стальных изделий проводились многими учеными [1–9].

При водовоздушной закалке крупных молотовых штампов из стали 5ХНМ размером 1400×710×500 мм [1] было получено оптимальное распределение структурных составляющих по сечению (на поверхности штампа – 75 % мартенсита и 25 % бейнита, в сердцевине – 10 % бейнита и 90 % сорбита), что привело как к повышению сопротивления поверхности штампа пластической деформации, так и к увеличению демпфирующей способности сердцевины.

Также было предложено использовать водовоздушное охлаждение для закалки калибров станов холодной прокатки труб (ХПТ), что позволило повысить их стойкость на 20–49 % по сравнению с традиционно применяемой технологией термической обработки (объемной закалкой в горячей воде или минеральном масле) [2–4].

Водовоздушное охлаждение применяется для упрочнения отливок из теплостойких сталей типа 20ХМФЛ [5]. В результате был достигнут высокий уровень механических свойств, удовлетворяющий самым жестким требованиям по равномерности их распределения по сечению изделия.

Наиболее широкое применение водовоздушное охлаждение нашло в термической обработке валков прокатных станов [6–8]. После закалки в водовоздушной смеси в приповерхностном слое поковки из стали 38ХМА диаметром 320 мм формируется преимущественно бейнитная структура, а на расстоянии 1/3 радиуса валка от поверхности наблюдается до 50 % бейнита, около 45 % перлита и отдельные участки структурно свободного феррита [6]. Уровень механических свойств валков после водовоздушной закалки и последующего отпуска со значительным запасом удовлетворяет требованиям российских и международных стандартов.

Установлено, что использование водовоздушного охлаждения позволяет повысить уровень свойств стальных прутков после прокатки [9], а также дает возможность заменить операцию низкого отпуска при ВТМО самоотпуском [10].

В то время как принципы работы устройств водовоздушного охлаждения и возможность их использования в практике термической обработки исследованы довольно подробно [11–16], водокапельные закалочные среды остаются малоизученными. Однако водокапельные закалочные устройства обладают теми же преимуществами, что и водовоздушные, а именно позволяют путем варьирования конструктивных и технологических параметров (давление воды, расстояние до охлаждаемой поверхности) получать требуемые условия охлаждения, а, следовательно, и структуру термообработанного материала, но гораздо проще в конструктивном и технологическом плане, так как не требуется дополнительного подвода сжатого воздуха.

#### ***Методика проведения эксперимента***

Исследован ряд форсунок центробежно-струйного типа с интегральным расходом воды 300–1000 л/ч. Эскиз форсунки представлен на рис. 1а. Форсунка состоит из штуцера – 1, сопла – 2, накидной гайки – 3 и вкладыша – 4.

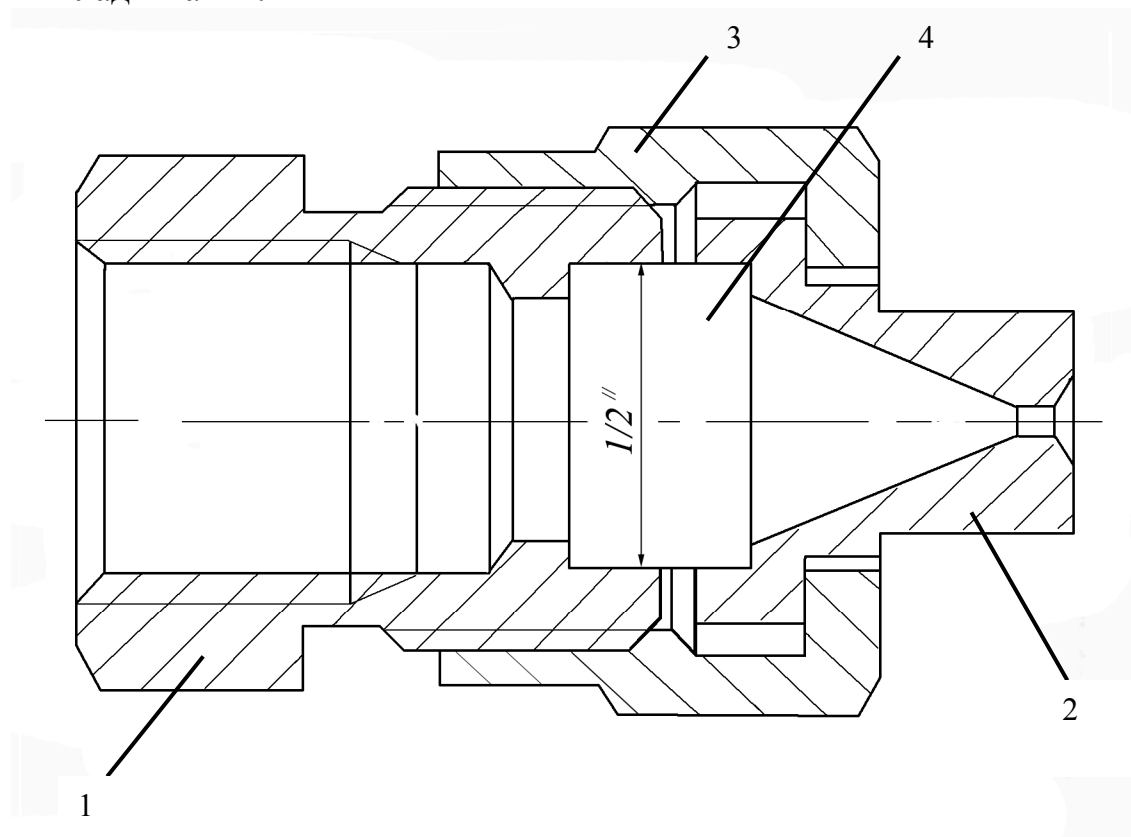


Рис. 1. а) Эскизы исследованных центробежно-струйных водокапельных форсунок: корпус форсунки с расходом воды 300–1000 л/ч

Сопла и вкладыши выполнены с различными конструктивными параметрами. Вкладыши (рис. 1б) имеют три сквозных канала – один центральный и два периферийных, расположенных на одной прямой по

диаметру. Вода под давлением подается в форсунку и через отверстия во вкладыше попадает в рабочую камеру сопла. В рабочей камере вода закручивается вследствие того, что периферийные отверстия во вкладыше просверлены под углом  $\beta$  к оси форсунки. Из рабочей камеры вода выбрасывается наружу через выпускное отверстие сопла, и под действием центробежной силы распыляется на мелкие капли. Форсунки данного типа применяются в настоящее время в установке водокапельного охлаждения для закалки крупных поковок на ОАО «Челябинский металлургический комбинат» [6].

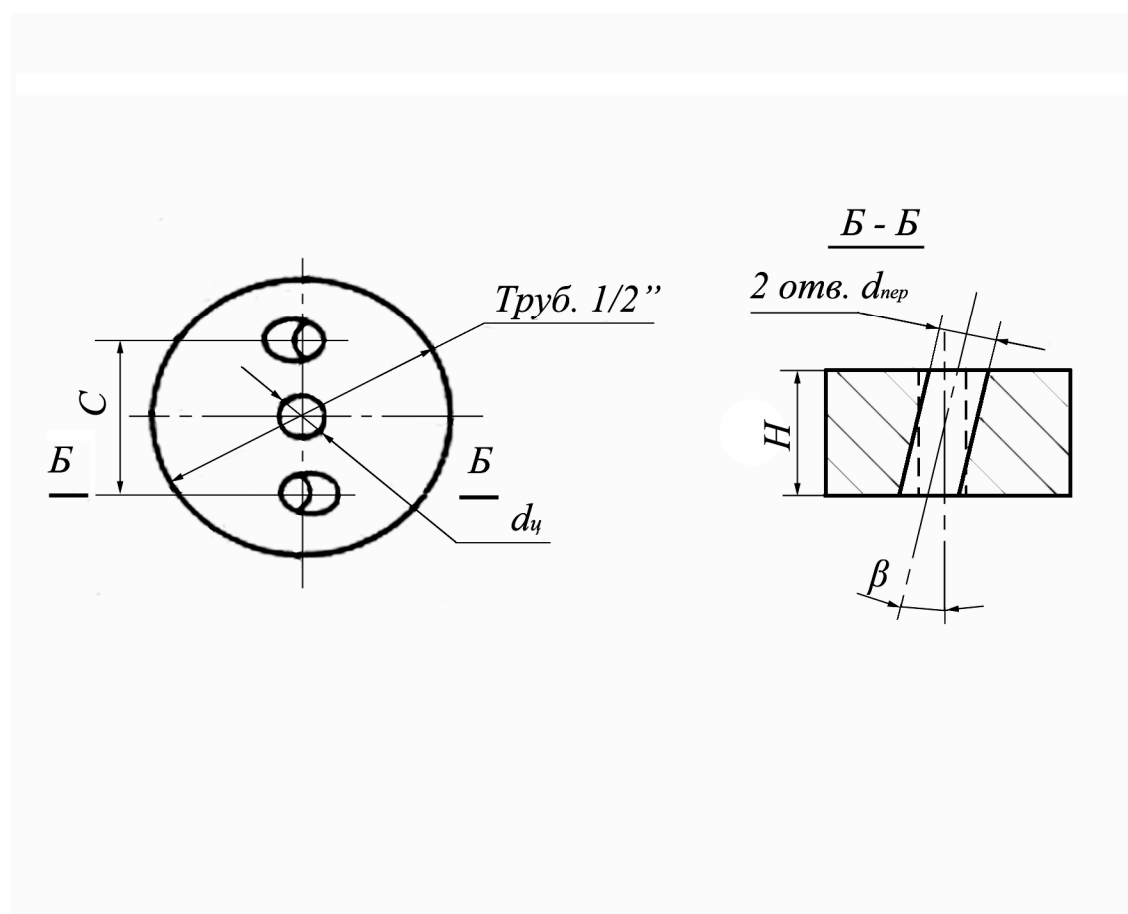


Рис. 1. б) Вкладыш форсунки с расходом воды 300–1000 л/ч

Исследования гидравлических характеристик форсунок в зависимости от их конструктивных параметров проводили при помощи специально разработанной лабораторной установки, конструкция, принцип работы и основные параметры которой приведены в [17].

Для исследования теплотехнических характеристик форсунок использовали термозонд из стали марки X18H10T, не испытывающей фазовых превращений при охлаждении. Он представляет собой сектор трубы диаметром 100 мм с толщиной стенки 10 мм, поверхность которого составляет 60×60 мм. Термозонд с одной стороны теплоизолирован для уменьшения тепловых потерь при охлаждении. Для измерения

температуры в процессе охлаждения внутрь термозонда, на расстоянии 1–2 мм под охлаждаемой поверхностью, заглублена термопара типа ХА. Температура нагрева термозондов составляла  $800 \pm 10$  °С.

### **Результаты исследований**

Проведен ряд экспериментов, которые позволили количественно оценить качество распыла центробежных форсунок различных конструкций с расходом воды 300–1000 л/ч. Были выбраны изменяемые конструктивные параметры: диаметр выпускного отверстия сопла (3–5 мм), диаметры центрального и периферийных (закручивающих) каналов вкладыша форсунки (1,5–4,5 мм). Испытания проводились при давлении воды 300 кПа и расстоянии до охлаждаемой поверхности 400 мм.

На рис. 2 приведены распределения плотности орошения форсунок с различными конструктивными параметрами. Форсунка с диаметром выпускного отверстия сопла 5 мм (рис. 2а, рис. 2в) обладает высоким расходом воды (1000 л/ч) и достаточно большой неравномерностью плотности орошения по охлаждаемой поверхности, градиент которой составляет до  $30 \text{ л/м}^3\text{с}$ . Уменьшение диаметра выпускного отверстия сопла до 3,5 мм привело к снижению расхода воды в 2 раза и значительному увеличению равномерности распределения плотности орошения по охлаждаемой поверхности (градиент составляет  $2 \text{ л/м}^3\text{с}$ ) (рис. 2б, рис. 2г).

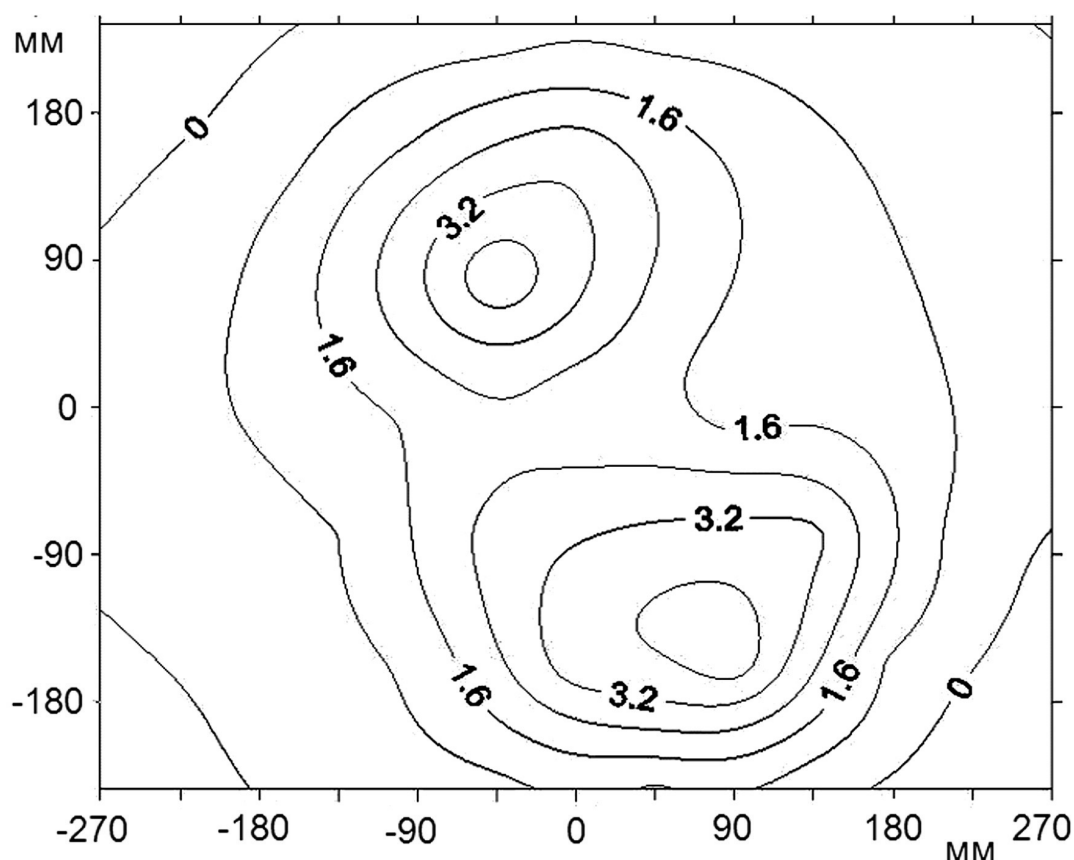


Рис. 2. а) Распределение плотности орошения по охлаждаемой поверхности в изолиниях и трехмерные: диаметр сопла 5 мм

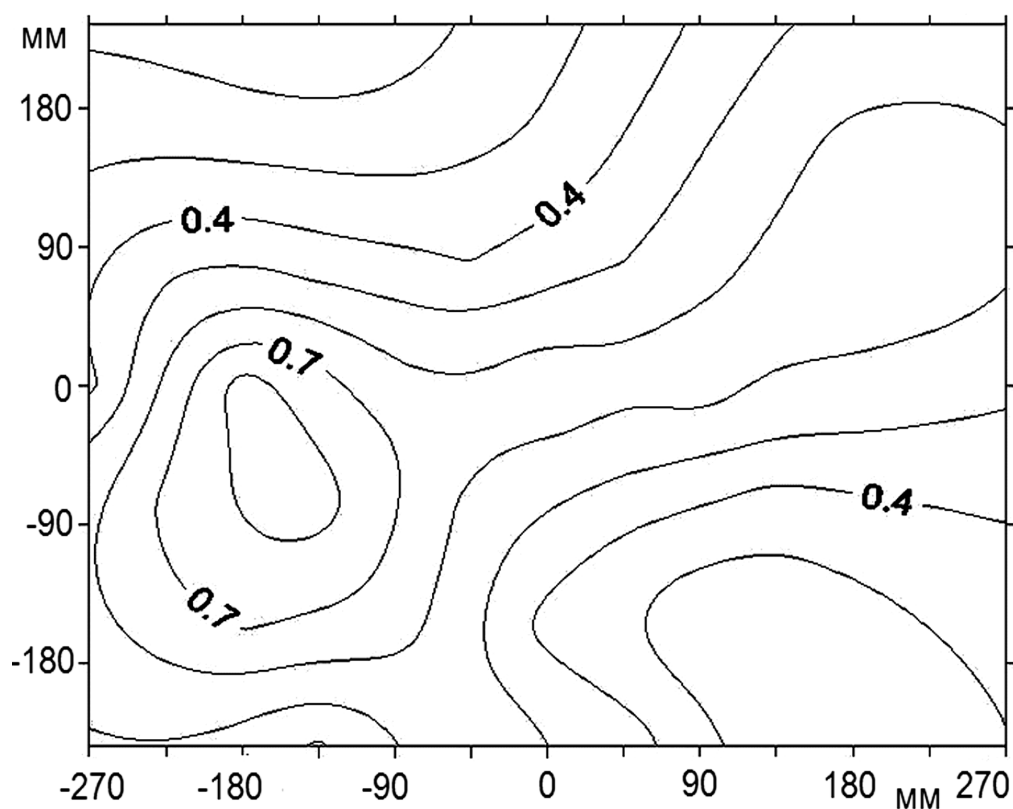


Рис. 2. б) Распределение плотности отношения по охлаждаемой поверхности в изолиниях и трехмерные: диаметр сопла 3,5 мм

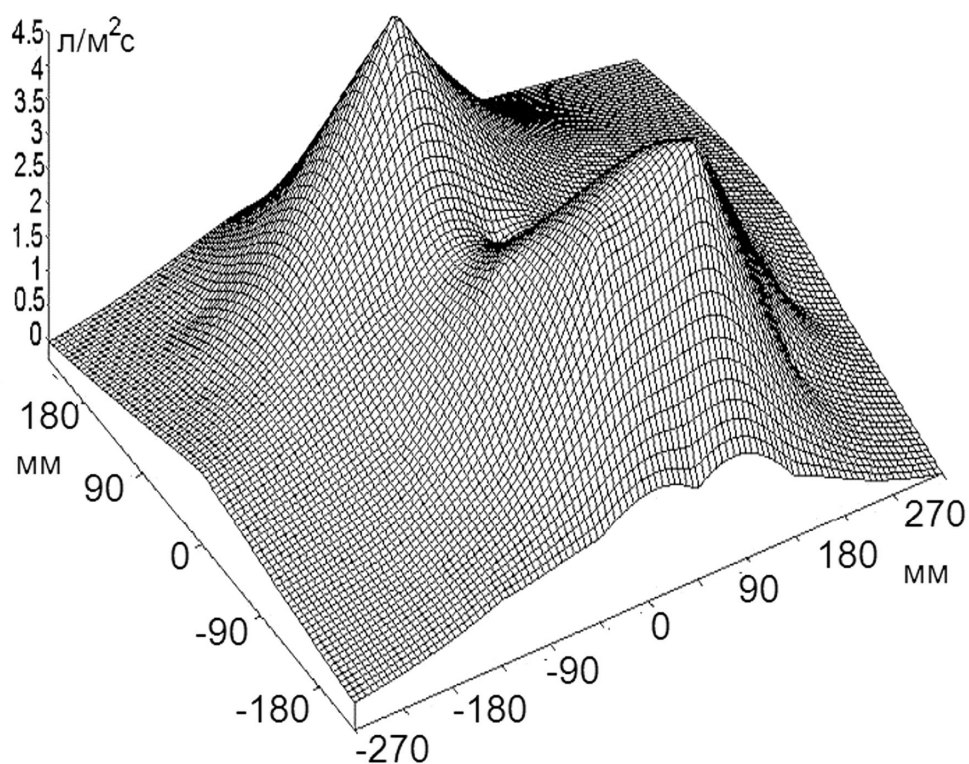


Рис. 2. в) Распределение плотности отношения по охлаждаемой поверхности в изолиниях и трехмерные: диаметр сопла 5 мм

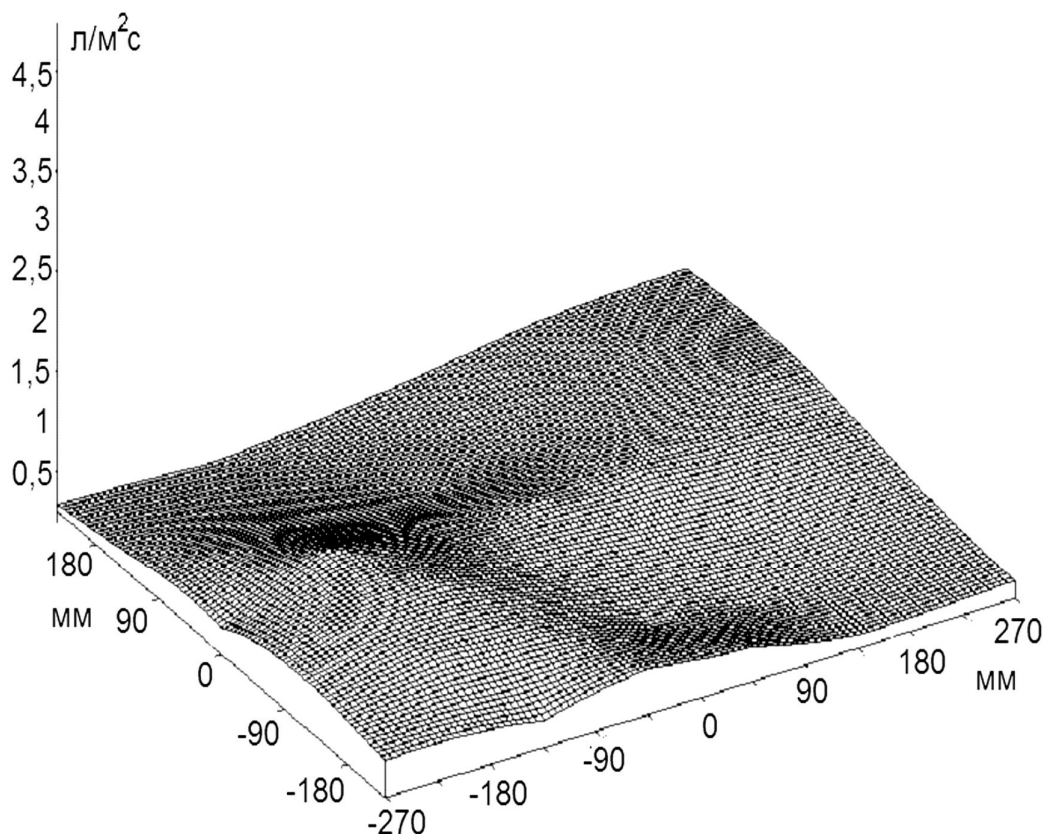


Рис. 2. з) Распределение плотности орошения по охлаждаемой поверхности в изолиниях и трехмерные: диаметр сопла 3,5 мм

Параметром, определяющим равномерность распыла, является среднеквадратичное отклонение плотности орошения по охлаждаемой площади. Уменьшение диаметра выпускного отверстия сопла от 5 мм до 3,5 мм приводит к снижению величины среднеквадратичного отклонения в 2–3 раза.

Проанализировав результаты экспериментов, определили, что наиболее равномерное распределение плотности орошения по сечению факела свойственно форсункам, диаметр центрального канала вкладыша которых составлял менее 4 мм (рис. 3). Причем чем меньше диаметр центрального и периферийных отверстий вкладыша форсунки, тем меньше среднеквадратичное отклонение плотности орошения.

Обобщение экспериментальных данных проведено с помощью регрессионного анализа, который позволил численно связать конструктивные параметры форсунок со средней плотностью орошения и ее среднеквадратичным отклонением. В результате для определения средней плотности орошения была получена следующая зависимость (1):

$$Q = 0,15 \cdot S_u^{0,59} \left( \frac{S_{nep} \cdot S_{сум}}{S_c} \right)^{0,44}, \quad (1)$$

где  $Q$  – средняя плотность орошения, л/м<sup>2</sup>с;  $S_c$  – площадь выпускного отверстия сопла, мм<sup>2</sup>;  $S_{ц}$  и  $S_{пер}$  – площади центрального и периферийных отверстий во вкладыше соответственно, мм<sup>2</sup>;  $S_{сум}$  – суммарная площадь отверстий во вкладыше, мм<sup>2</sup>.

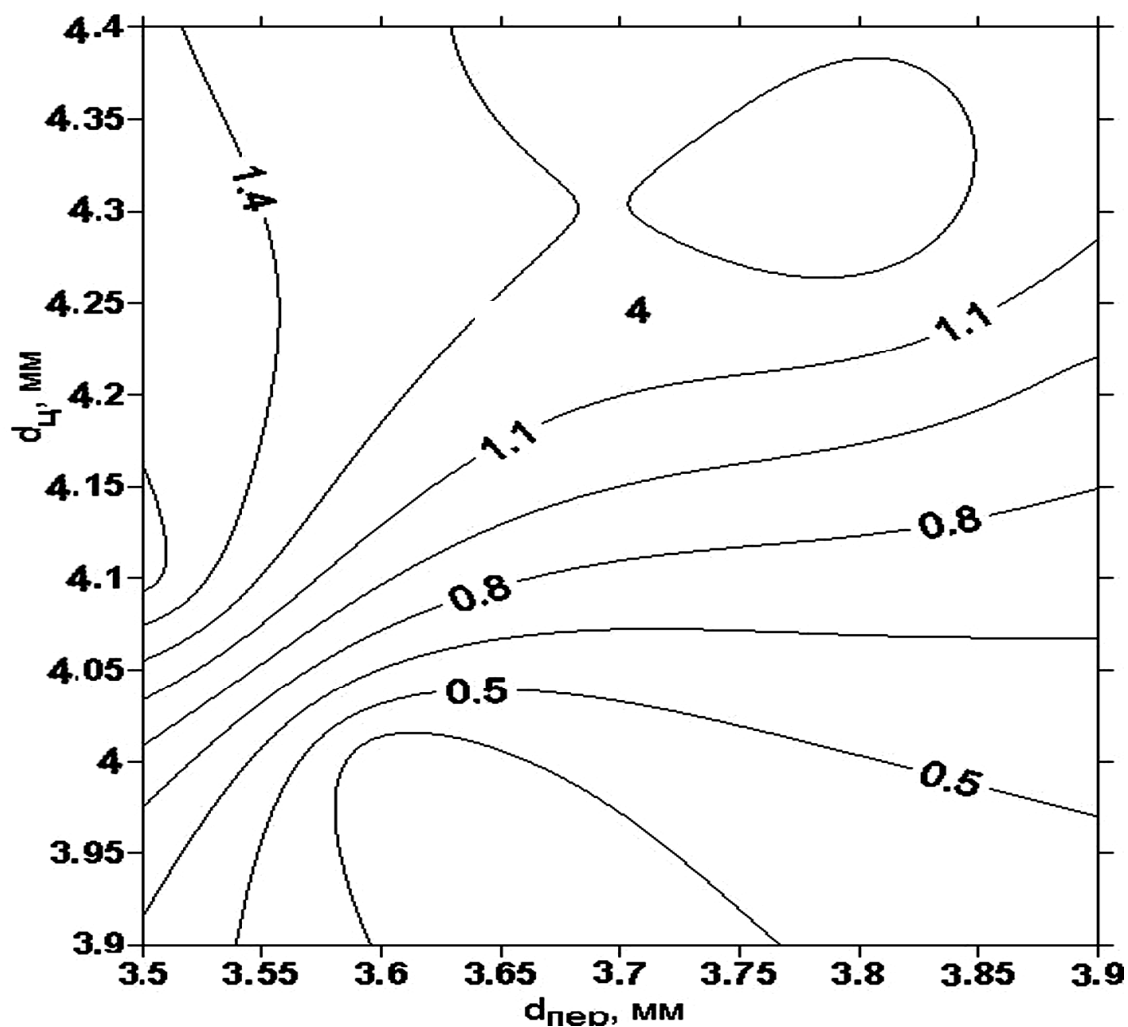


Рис. 3. а) Зависимость среднеквадратичного отклонения плотности орошения от диаметра отверстий во вкладыше: диаметр сопла 5 мм



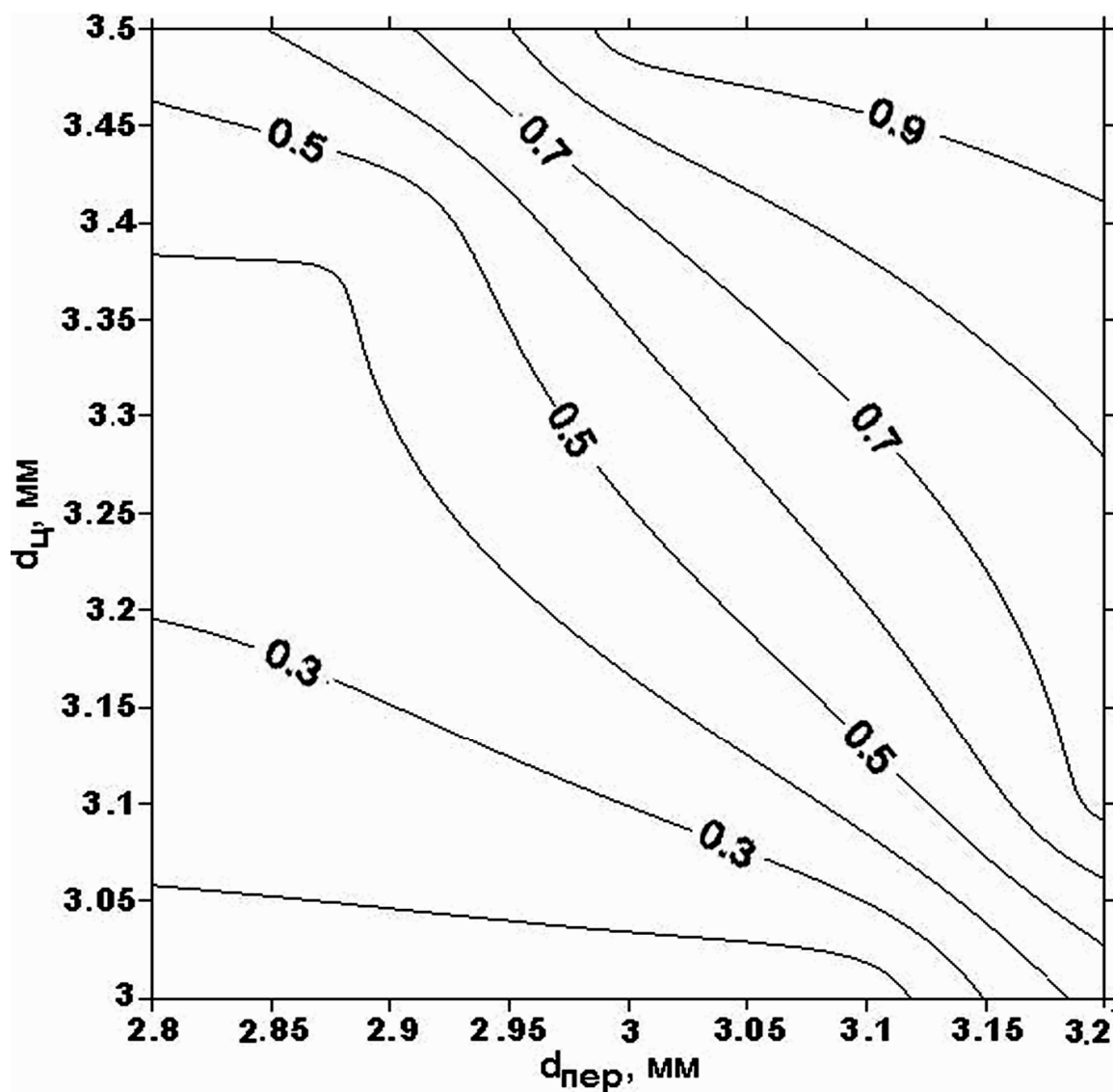


Рис. 3. б) Зависимость среднеквадратичного отклонения плотности орошения от диаметра отверстий во вкладыше: диаметр сопла 3,5 мм.

Для модели, описываемой уравнением (1), коэффициент множественной корреляции составляет 0,98, отношение табличного к расчетному критериев Фишера – 115 при доверительной вероятности 0,95.

Для среднеквадратичного отклонения плотности орошения получено уравнение (2):

$$S_Q = 0,17 \cdot \frac{S_y^{5,29}}{S_{пер}^{0,16} \cdot S_c^{2,43}}, \quad (2)$$

Коэффициент множественной корреляции для модели, описываемой уравнением (2), составляет 0,97, а отношение табличного значения критерия Фишера к расчетному при доверительной вероятности 0,95 составило 32, что говорит о достаточной адекватности полученной модели.

Как видно из уравнения (1), увеличение диаметра каналов во вкладыше (центрального и периферийных) в исследованном диапазоне значений (1,5–4,5 мм) увеличивает значение средней плотности орошения на 0,4–0,5 л/м<sup>2</sup>·с (на 70 %), а увеличение диаметра сопла форсунки приводит к снижению плотности орошения в 2 раза. При этом увеличение площади центрального отверстия повышает неравномерность распределения плотности орошения по сечению факела форсунки, а увеличение площади периферийных отверстий приводит к ее снижению. Увеличение диаметра сопла форсунки в исследованном диапазоне значений (3,5–5 мм) приводит к снижению среднеквадратичного отклонения плотности орошения.

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволило решить оптимизационную задачу и определить оптимальные конструктивные параметры форсунки, обладающей высокими значениями средней плотности орошения (1,0–1,2 л/м<sup>2</sup>·с) при ее достаточно равномерном распределении по охлаждаемой поверхности (среднеквадратичное отклонение 0,4–0,5 л/м<sup>2</sup>·с).

Для данной форсунки, обладающей оптимальной конструкцией и наименьшим расходом воды из всех исследованных конструкций форсунок (300 л/ч), были проведены исследования влияния технологических параметров водокапельного охлаждения (давление воды, расстояние от сопла форсунки до охлаждаемой поверхности) на охлаждающую способность, или, иными словами, на зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемой поверхности. Давление воды варьировалось в диапазоне 200–400 кПа, а расстояние до охлаждаемой поверхности – в диапазоне 100–400 мм.

Определение зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от температуры охлаждаемой поверхности производился по формуле, аналогичной приведенной в [12]:

$$\alpha = \frac{c \cdot \rho \cdot \delta \cdot V_{\text{охл}}}{t - t_c}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $c$  – удельная теплоемкость охлаждаемого металла, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – расстояние от охлаждаемой поверхности до горячего спая термопары, м;  $V_{\text{охл}}$  – текущая скорость охлаждения, °С/с;  $t$  – текущая температура металла, °С;  $t_c$  – температура охлаждающей среды (воды), °С.

Показано, что изменение давления перед форсункой от 200 до 300 кПа при расстоянии до охлаждаемой поверхности 100 мм практически не влияет на значение коэффициента теплоотдачи, который составляет 800–1000 Вт/м<sup>2</sup>·К в интервале температур 400–800 °С, а при понижении температуры поверхности ниже 350–400 °С возрастает до 3000 Вт/м<sup>2</sup>·К. Увеличение расстояния до охлаждаемой поверхности до 220 мм (при

давлении воды 200 кПа) приводит к снижению коэффициента теплоотдачи в диапазоне температур 400–800 °С в 1,5–1,7 раза.

Установлено, что влияние плотности орошения на коэффициент теплоотдачи в различных температурных интервалах неоднозначно [18]. Она достаточно сильно влияет в температурном интервале 400–800 °С (при уменьшении плотности орошения в 5 раз величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  уменьшается примерно в 1,5 раза) и фактически не оказывает влияния ниже 350 °С. Это объясняется тем, что при температуре выше 400 °С на охлаждаемой поверхности образуется паровая пленка, которая сбивается сильным потоком воды при охлаждении на расстоянии 100 мм. При увеличении расстояния до охлаждаемой поверхности до 220 мм уменьшается величина плотности орошения и кинетическая энергия падающих капель, что способствует сохранению на охлаждаемой поверхности устойчивой паровой пленки. При температуре поверхности ниже 350 °С наступает неустойчивый режим охлаждения, при котором пленочное кипение сменяется пузырьковым [13; 19]. В этом случае величина скорости потока и плотности орошения в определенных пределах практически не оказывают влияния на значение коэффициента теплоотдачи [20].

Применение одного типа форсунок для закалки стальных изделий нецелесообразно. Исследованные форсунки с расходом воды 300–1000 л/ч, обладая достаточно высоким коэффициентом теплоотдачи в интервале температур возможного перлитного превращения (550–750 °С), имеют достаточно большую неравномерность плотности орошения. Кроме того, в интервале температур мартенситного превращения (200–350 °С для конструкционных сталей) величина коэффициента теплоотдачи возрастает, что вызовет увеличение скорости охлаждения и, как следствие, приведет к появлению высоких временных напряжений, являющихся причиной закалочных трещин. Однако конструкция данных форсунок не позволяет снизить коэффициент теплоотдачи в области мартенситного превращения до необходимого уровня снижением давления воды или уменьшением площади каналов вкладыша, так как это приводит к нестабильной работе форсунки.

Поэтому следует объединять данные форсунки в устройствах совместно с другими, обладающими более низкой охлаждающей способностью в интервале температуры мартенситного превращения. При последовательной работе таких форсунок будет получена высокая скорость охлаждения достаточно массивных изделий в интервале температур перлитного и бейнитного превращений. В момент достижения температур мартенситного превращения переключением с одного на другой тип форсунок скорость охлаждения существенно снизится.

Для достижения этой цели была предложена конструкция центробежно-струйной водокапельной форсунки с интегральным расходом воды 12–15 л/ч.

По методике, изложенной выше, были проведены исследования влияния конструктивных параметров форсунки на значение средней плотности орошения, а также была изучена их охлаждающая способность. В качестве изменяемых конструктивных параметров были выбраны: диаметр периферийных отверстий  $d_0$ , диаметр камеры смешивания  $d_1$ , ширина тангенциальных каналов  $L$ . В результате обобщения экспериментальных данных получено уравнение регрессии (3):

$$Q = 0,372 - 0,487d_0 + 0,061d_1 + 0,270L - 0,284H, \quad (4)$$

где  $Q$  – средняя плотность орошения, л/м<sup>2</sup>·с;  $d_0$  – диаметр периферийных отверстий, мм;  $d_1$  – диаметр камеры смешивания, мм;  $L$  – ширина тангенциальных каналов, мм;  $H$  – расстояние от среза сопла форсунки до охлаждаемой поверхности, м.

Наибольший положительный вклад в значение средней плотности орошения вносит ширина тангенциальных каналов вкладыша форсунки. Увеличение ширины канала в 2 раза от 0,5 до 1,0 мм приводит к повышению средней плотности орошения от 0,04 до 0,16 л/м<sup>2</sup>·с. Увеличение диаметра периферийных отверстий от 1,2 до 1,4 мм приводит к понижению средней плотности орошения в 3 раза. При этом увеличение расстояния до охлаждаемой поверхности от 150 до 450 мм снижает значение средней плотности орошения в 2,5 раза от 0,15 до 0,06 л/м<sup>2</sup>·с.

Теплотехнические исследования форсунки с расходом 12–15 л/ч показали, что при увеличении давления воды от 200 до 300 кПа (расстояние до охлаждаемой поверхности 100 мм) коэффициент теплоотдачи в интервале температур 100–300 °С снижается примерно в 2 раза и составляет 350–500 Вт/м<sup>2</sup>·К. Это связано с уменьшением плотности орошения в центре факела и большей степенью дисперсности капель распыленной воды. При более высоких температурах (500–800 °С) изменение давления не оказывает существенного влияния на коэффициент теплоотдачи, который составляет порядка 150–200 Вт/м<sup>2</sup>·К.

С увеличением расстояния от форсунки до охлаждаемой поверхности (от 100 до 220 мм, при давлении 200 кПа) коэффициент теплоотдачи в интервале температур 100–300 °С снижается в 1,5 раза, а при более высоких температурах (350–800 °С) практически не изменяется, и остается на уровне около 150 Вт/м<sup>2</sup>·К при давлении 300 кПа и 200 Вт/м<sup>2</sup>·К при давлении 200 кПа.

Дальнейшее уменьшение давления нецелесообразно, так как приводит к неустойчивой работе форсунки, и режим ее работы может случайным образом изменяться от центробежно-струйного к струйному.

Установлено, что зависимость среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи от средней плотности орошения для центробежно-струйных форсунок носит существенно нелинейный характер (рис. 4). Данная зависимость согласуется с результатами, приведенными в [21].

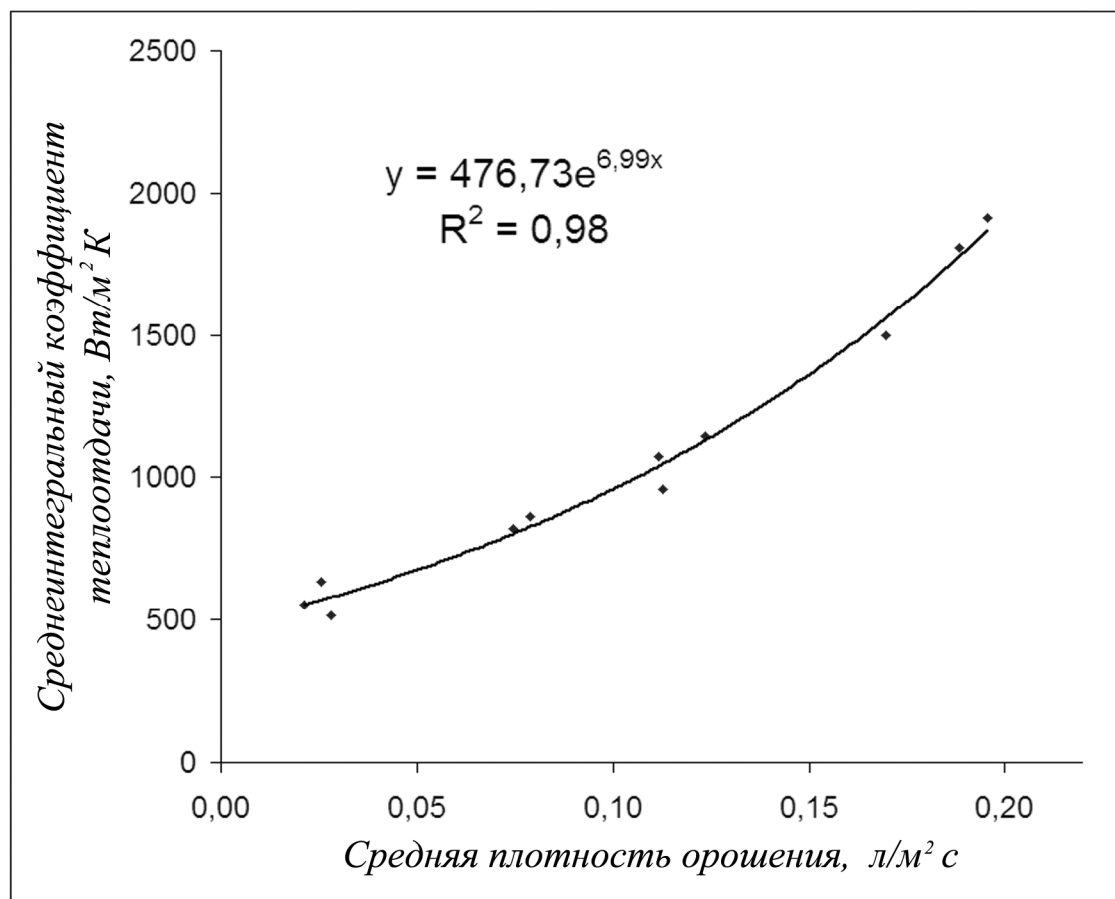


Рис. 4. Зависимость среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи от средней плотности орошения для форсунок с расходом воды 12–15 л/ч

Исходя из полученных зависимостей коэффициента теплоотдачи от плотности орошения, а также плотности орошения от конструктивных параметров исследованных водокапельных центробежно-струйных форсунок, может быть решена обратная задача – по заданной жесткости охлаждения для конкретной детали из известной марки стали можно определить необходимую плотность орошения с целью получения требуемых структур. Это позволяет, вводя ограничения на необходимую равномерность плотности орошения, определить тип форсунки водокапельного охлаждения с оптимальными значениями конструктивных параметров.

Рассмотренная методика была применена для разработки технологии термоупрочнения сварных соединений бурильных труб из стали 25ХГМ и замков из стали 40ХМФА.

Для оценки требуемой скорости охлаждения сварного соединения бурильных труб после индукционного нагрева проведено численное моделирование процесса закалки в средах с различной охлаждающей способностью (спокойный воздух, сжатый воздух, масло, водокапельное охлаждение различной интенсивности).

Расчет температурных и структурных полей, формирующихся в стальных изделиях при произвольном охлаждении из аустенитного состояния, проводился по методике [22] путем пересчета изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита [23] для заданных термических траекторий точек сечения стенки трубы толщиной 20–38 мм.

Проведенные расчеты для сталей 25ХГМ и 40ХМФА показали, что сталь 25ХГМ имеет в структуре до 60–70 % мартенсита и бейнита. При этом в структуре стали 40ХМФА образуется до 98–100 % мартенсита.

Установлено, что оптимальное сочетание механических свойств металла замка из стали 40ХМФА и трубы из стали 25ХГМ может быть достигнуто при охлаждении со среднеинтегральным коэффициентом теплоотдачи порядка 800–1000 Вт/м<sup>2</sup>К. Исходя из полученного значения интенсивности охлаждения и зависимости среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи от плотности орошения выбрана оптимальная конструкция водокапельной центробежно-струйной форсунки с расходом воды 12–15 л/ч. Такая форсунка обеспечивает необходимую жесткость охлаждения стали 25ХГМ и не вызывает повышенного уровня временных напряжений в стали 40ХМФА.

На базе форсунок с расходом 12–15 л/ч разработано и оптимизировано охлаждающее устройство водокапельного типа. Опытно-промышленные испытания разработанной технологии термоупрочнения сварных соединений бурильных труб показали, что после закалки в водокапельном устройстве в течение 9 мин. и последующего высокого отпуска механические свойства сварного соединения соответствуют группе прочности G-105 согласно стандарту API 5D.

### **Выводы**

1. В результате гидравлических испытаний водокапельных форсунок центробежно-струйного типа были получены зависимости, связывающие конструктивные параметры форсунок с величиной средней плотности орошения и равномерностью ее распределения по орошаемой поверхности. Данные зависимости позволили расчетно-экспериментальным методом определить наиболее оптимальную конструкцию форсунки.

2. Исследовано влияние теплотехнических параметров на охлаждающую способность форсунок центробежно-струйного типа. Установлены зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности орошения. Для форсунок с расходом воды 300 л/ч влияние изменения плотности орошения на коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  примерно пропорционально корню 4 степени, т.е. при уменьшении плотности

орошения в 5 раз величина  $\alpha$  уменьшается в 1,5 раза. Для форсунок с расходом воды 12–15 л/ч зависимость среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи от средней плотности орошения носит экспоненциальный характер.

3. Форсунки с расходом воды 300–1000 л/ч могут применяться для термической обработки изделий, когда требуются значительные скорости охлаждения и нет опасности возникновения закалочных трещин. Наиболее целесообразно использовать данные форсунки в закалочных устройствах совместно с форсунками другого типа или конструкции, обладающими более низкой охлаждающей способностью в интервале температур мартенситного превращения.

4. На основании предложенной методики разработана и оптимизирована технология термической обработки сварного соединения бурильных труб с использованием водокапельного охлаждающего устройства. После водокапельной закалки форсунками с расходом воды 12–15 л/ч и последующего высокого отпуска сварного соединения сталей 40ХМФА и 25ХГМ механические свойства достигают уровня группы прочности G-105 по стандарту API 5D.

#### **Список использованных источников**

1. *Борисов И.А., Голанд Л.Ф.* Охлаждение крупных поковок в водно-воздушной смеси // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1988. № 10. С. 17–22.
2. *Шмырев И.П.* Водно-воздушная закалка калибров станов ХПТ / Шмырев И.П., Суржигов В.А., Мавродий П.Д., Андреев Е.А., Трегубова Л.И. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1976. № 7. С. 42–44.
3. *Белошапко М.В.* Водно-воздушная закалка калибров станов ХПТ-250 из стали 9Х2МФ / Белошапко М.В., Шмырев И.П., Мазаник В.Ф., Бондарева Л.М., Зимовейская С.И. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1982. №2. С. 23–25.
4. *Юдин Ю.В.* Проблемы повышения стойкости калибров станов ХПТ / Юдин Ю.В., Эйсмонтт Ю.Г., Кузьмина Е.Н., Порох И.Ф. : материалы Междун. конф. «Трубы – 2005», Челябинск. 2005. С. 203–208.
5. *Немзер Н.А.* Нормализация отливок в камере водовоздушного охлаждения / Немзер Н.А., Немзер Г.Г., Ковалев А.Г. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1994. № 11. С. 2–4.
6. *Пышминцев И.Ю.* Закалка крупных поковок в водно-воздушной смеси / Пышминцев И.Ю., Эйсмонтт Ю.Г., Юдин Ю.В., Шабуров Д.В., Захаров В.Б. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2003. № 3. С. 24–28.

7. Захаров В.Б. Выбор водовоздушных сред для закалки крупных поковок / Захаров В.Б., Шабуров Д.В., Юдин Ю.В., Пышминцев И.Ю., Эйсмонтт Ю.Г. // Сталь. 2003. № 3. С. 60–62.
8. Борисов И.А. Разработка технологии спрейерной закалки опорных валков прокатных станов / Борисов И.А., Борисов А.И. // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1997. № 8. С. 2–4.
9. Morales R.D. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods / R.D. Morales, A.G. Lopez, I.M. Olivares // ISIJ International, 1990. Vol. 30. № 1. P. 48–57.
10. Палей Ю.М. Исследование влияния спрейерного охлаждения при ВТМО на структуру и свойства сталей 38ХС и 30ХГСН2А / Палей Ю.М., Павлов В.В., Александров В.Л. // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1981. № 2. С. 30–35.
11. Lee S.-M. Problems in Using the Air-mist Spray Cooling and Its Solving Methods at Pohang No. 4 Continuous Casting Machine / S.-M. Lee, S.Y. Jang // ISIJ International, 1996. Vol. 36. №9. P. 208–210.
12. Будрин Д.В. Водо-воздушное охлаждение при закалке / Д.В. Будрин, В.М. Кондратов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1965. № 6. С. 22–25.
13. Mizikar E.A. Spray Cooling Investigation for Continuous Casting of Billets and Blooms / E.A. Mizikar // Journal of The Iron and Steel Engineer. 1970. № 7. P. 53–60.
14. Эйсмонтт Ю.Г. Получение и применение жидкостно-воздушных закалочных сред / Эйсмонтт Ю.Г., Шустов А.В., Пильщиков Е.Ф., Сакулин А.А., Ульянов В.А. // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1980. № 11. С. 43–45.
15. Будрин Д.В. Особенности спрейерного метода охлаждения при термообработке / Д. В. Будрин, В. М. Кондратов // Известия вузов «Черная металлургия». 1964. № 11. С. 168–173.
16. Lee P. The Effect of Nozzle Height on Cooling Heat Transfer from a Hot Steel Plate by an Impinging Liquid Jet / P. Lee, H. Choi, S. Lee // ISIJ International, 2004. Vol. 44. P. 704–709.
17. Майсурадзе М.В. Разработка технологии термической обработки и конструкций водокапельных охлаждающих устройств : автореф. дис... к.т.н. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2008. 19 с.
18. Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Характеристики водокапельных форсунок центробежно-струйного типа, используемых для закалки сталей // Известия вузов «Черная Металлургия». 2008. № 8. С. 45–48.
19. Кобаско Н.И. Технологические аспекты охлаждения при закалке (обзор) // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1991. № 4. С. 2–8.
20. Динер А. Обзор литературы по теплопередаче при струйном охлаждении // Черные металлы. 1976. № 4. С. 26–29.



21. *Fujimoto H.* Predictable Modeling of Heat Transfer Coefficient between Spraying Water and a Hot Surface above the Leidenfrost Temperature / H. Fujimoto, N. Hatta, H. Asakawa, T. Hashimoto // *ISIJ International*, 1997. Vol. 37. № 5. P. 492–497.

22. *Власова Н.В.* Напряженно-деформированное состояние стальных деталей при регулируемом охлаждении / Власова Н.В., Адамова Н.А., Сорокин В.Г. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1986. № 12. С. 38–41.

23. *Попова Л.Е., Попов А.А.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и  $\beta$ -раствора в сплавах титана: справочник термиста. М.: Металлургия, 1991. 503 с.