

Днепродзержинский государственный технический университет

## РАСЧЕТ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОЙ СМЕСЬЮ

**Введение.** Охлаждение деталей при резании струей воздушно-жидкостной смеси известен достаточно давно. Его рекомендуют применять при лезвийной обработке, особенно когда применение других способов подачи смазывающе-охлаждающей жидкости затруднен. Привлекательность такого способа связан с очень малыми расходами жидкости, не превышающими 0,5л/час, что снижает затраты на ее приготовление, исключает необходимость сбора и переработки и имеет положительный экологический эффект.

Идея этого способа охлаждения заключается в интенсификации процесса путем изменения вида теплообмена. Если при подаче смазывающе-охлаждающей жидкости поливом или напорной струей имеет место конвективный теплообмен, то при охлаждении струей воздушно-жидкостной смеси целью является создание режима кипения жидкости, поскольку известно, что коэффициенты теплоотдачи в этом случае значительно выше.

Известно также [1], что одним из направлений интенсификации процесса теплоотдачи является переход от кипения в большом объеме или пленочного кипения к капельному кипению. Однако реализация такого процесса требует определенных условий и не всегда возможна.

Вопросам поведения капель жидкости на поверхности, нагретой выше температуры кипения, посвящено достаточно много работ. В некоторых работах [2, 3] рассматривается капля в условиях образования паровой прослойки между ней и нагретой поверхностью, в других [4] – отскок капель или их «взрывное» испарение [5]. Наибольший интерес представляют работы, в которых исследуется поведение капли жидкости вблизи температуры Лейденфроста [1]. Испарение капли при несколько более низких температурах имеет аналогию с пузырьковым кипением в большом объеме и отличается наиболее высокой интенсивностью теплообмена. Считается, что для воды температура Лейденфроста составляет около 200°C. При многих процессах лезвийной обработки имеют место температуры такого порядка и, таким образом, имеются предпосылки организации очень эффективного процесса теплоотвода.

Хотя позитивные результаты практического использования способа охлаждения деталей струей воздушно-жидкостной смеси при токарной обработке, пазовом и торцевом фрезеровании, зубострогании и зубофрезеровании широко известны и существуют работы, посвященные экспериментальным и теоретическим исследованиям процессов такого охлаждения [6], до настоящего времени отсутствуют обоснованные методики определения таких важных параметров, как необходимый расход жидкости, уровень ее дисперсности, скорость потока.

**Постановка задачи.** В данной статье рассматривается задача определения расхода смазывающе-охлаждающей жидкости в двухфазной среде, обеспечивающего режим капельного кипения при принятых размерах капель и скорости потока.

**Результаты работы.** Максимальный эффект при охлаждении воздушно-жидкостной смесью будет достигнут, если наибольшая масса капель жидкости полностью испарится в режиме капельного кипения. Для этого капли на охлаждаемой поверхности должны располагаться в один слой и при этом покрывать максимальную

площадь. Количество капель в одном слое на единице поверхности можно представить как

$$n_s = \frac{1}{d_n^2}, \quad (1)$$

где  $d_n$  – диаметр пятна контакта капли с поверхностью при максимальной деформации капли, который в [7] предложено определять по формуле

$$d_n = 4V \sqrt{\frac{\rho R_k^3}{6\sigma}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы смеси;  $\rho$  – ее плотность;  $V$  – скорость капли;  $R_k$  – радиус капли.

Соответственно объемное содержание капель составит

$$n_v = \frac{1}{d_n^3}. \quad (3)$$

При таком объемном содержании капель и равномерном распределении их в струе воздушно-жидкостной смеси расстояние между последовательными каплями равно  $d_n$ , а время подлета следующей капли

$$\tau_n = d_n / V. \quad (4)$$

Расчеты по зависимости, предложенной в [7], и результаты экспериментальных исследований [1] показывают, что время максимальной деформации капли очень мало и составляет незначительную долю времени ее полного испарения. Поэтому можно считать, что для однослойного расположения капель и максимального покрытия ими охлаждаемой поверхности подлет очередной капли должен произойти в момент полного испарения предыдущей.

В [6] связь объемного содержания капель диаметром  $d_k$  с их концентрацией  $K$  в воздушно-жидкостной смеси приведена в виде

$$n_v = \frac{6K}{d_k^3}. \quad (5)$$

С учетом (2), (3) и (5) оптимальную концентрацию капель в воздушно-жидкостной смеси можно представить в следующем виде:

$$K \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho \cdot V^2 \cdot R_k}\right)^3}. \quad (6)$$

Для жидкой фазы со свойствами воды, которыми обычно обладают смазывающе-охлаждающие жидкости, можно записать

$$K \approx 6 \cdot 10^{-7} \sqrt{\left(\frac{1}{V^2 \cdot R_k}\right)^3}. \quad (7)$$

При меньших концентрациях теплоотвод будет снижаться за счет уменьшения количества одновременно испаряющихся капель, при больших концентрациях – за счет нарушения режима капельного кипения. Это косвенно подтверждается результатами экспериментальных исследований [8], где эффект охлаждения деталей при резании струей воздушно-жидкостной смеси повышался лишь до некоторых значений концен-

трации жидкой фазы. Дальнейшее увеличение количества жидкости не только не улучшало ситуацию, но и даже снижало эффективность охлаждения.

Далее необходимо установить, возможна ли реализация оптимального сценария охлаждения и какие условия необходимы для этого.

При испарении капли жидкости в результате ее кипения поглощается количество теплоты

$$Q = \frac{4}{3} \pi \cdot R_k^3 \cdot \rho \cdot r, \quad (8)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования.

С другой стороны, количество теплоты при кипении можно определить по формуле

$$Q = \alpha_{кин} (t_n - t_k) \cdot F \cdot \tau, \quad (9)$$

где  $\alpha_{кин}$  – коэффициент теплоотдачи при кипении;  $t_n$  – температура нагретой поверхности;  $t_k$  – температура кипения жидкой фазы;  $(t_n - t_k)$  – температурный напор;  $\tau$  – время процесса (в данном случае время испарения капли);  $F$  – площадь соприкосновения капли с охлаждаемой поверхностью.

Последняя с учетом (2) определяется как

$$F = 4\pi \frac{\rho \cdot V^2 \cdot R_k^3}{6\sigma}. \quad (10)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при капельном кипении воспользуемся результатами экспериментальных исследований, приведенными в [1] для относительно больших капель воды, движущихся с невысокими скоростями (диапазон размеров капель 2,567...5,692мм, диапазон скоростей 0,88...2,586м/с, диапазон температур поверхности 110...232°C). Результаты приведены в виде следующего критериального уравнения

$$Nu = 8,97 \cdot 10^{14} \cdot Gr^{0,88} \cdot Oh^{4,41} \cdot Re^{0,01}, \quad (11)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Gr$  – критерий Грасгофа;  $Oh$  – критерий Онезорге;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Для данного случая критерии подобия имеют следующий вид.

Критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot d_k^3}{\mu^2} \beta \cdot \Delta t, \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность воды при температуре кипения;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воды при температуре кипения;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воды при температуре кипения;  $\Delta t$  – температурный напор.

Критерий Онезорге

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot d_k}}. \quad (13)$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}. \quad (14)$$

Используя выражения (8)-(14), получим выражение для определения времени полного испарения капли:

$$\tau_{и} = \frac{41,4}{V^{2,01} \cdot d_{к}^{0,55} \cdot \Delta t^{1,88}} \cdot \quad (15)$$

Расчеты по формулам (4) и (15) показывают, что для относительно больших капель воды, движущихся с невысокими скоростями, время подлета капли при любых условиях меньше времени ее испарения. Таким образом, при концентрации, определенной из выражения (6), капельный режим кипения реализуется только для первого слоя капель.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие определить время испарения мелких капель, движущихся с высокими скоростями. Однако, есть основания считать, что тенденция уменьшения времени испарения капли по мере увеличения ее скорости и уменьшения размеров, отраженная в выражении (14), сохранится для мелких высокоскоростных капель. Тогда для капель воды диаметром порядка 10...20мкм и скоростей потока свыше 100м/с нижняя граница концентрации капель в воздушно-жидкостной смеси может быть определена согласно выражению (6).

**Выводы.** Выполненные исследования позволяют утверждать, что реализация режима капельного кипения для охлаждения деталей при резании с относительно невысокими температурами струей воздушно-жидкостной смеси невозможна в условиях использования низкоскоростных струй, содержащих жидкую фазу в виде крупных капель.

Для высокоскоростных (более 100м/с), мелкодисперсных (менее 10...20мкм) струй, полученных из водных смазывающе-охлаждающих жидкостей, предложена зависимость для определения нижнего предела концентрации воздушно-жидкостной смеси, реализующей режим капельного кипения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Критериальная зависимость для испарения одиночной капли жидкости на поверхности нагрева / П.С.Васильев, С.Л.Рева, Л.С.Рева, А.Б.Голованчиков // Волгоградский государственный технический университет nestorvv@mail.ru, maser7@bk.ru, rahp@vstu.ru.
2. Бувич Ю.А. К теории падения капель на перегретую поверхность / Бувич Ю.А., Манкевич В.Н., Полоцкий М.И. // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т.24, №4. – С.743-752.
3. Брич М.А. Взаимодействие диспергированной жидкости с нагретой поверхностью / М.А.Брич // Инженерно-физический журнал. – 1981. – Т.40, №1. – С.35-40.
4. Особенности теплообмена при соударении капли с горячей поверхностью / А.А.Гухман, А.З.Вольнец, А.В.Рождественский, С.М.Бражников // Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т.49, №4. – С.598-601.
5. Бувич Ю.А. К теории ударного кипения / Ю.А.Бувич, В.В.Мансуров // Инженерно-физический журнал. – 1984. – Т.47, №6. – С.919-923.
6. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / Резников А.Н., Резников Л.А. – М.: Машиностроение, 1990. – 228с.
7. Жадан И.А. Деформация капель распыленной смазывающе-охлаждающей жидкости. Жадан И.А., Панасенко А.С., Чухно С.И. // Сборник научных трудов КГМТУ. – Керчь. – 2010г. – Выпуск 11. – С.186-188.
8. Тихонов В.М. Охлаждающие свойства смазывающе-охлаждающих жидкостей / В.М.Тихонов // Станки и инструмент. – 1966. – №8. – С.6-9.

Поступила в редколлегию 13.09.2016.