

- поиск погрешности, обусловленной износом режущего инструмента;
- поиск погрешности настройки станка;
- поиск погрешности установки заготовки;
- поиск случайной погрешности.

Моделью, описывающей алгоритм автоматизированного расчета суммарной погрешности обработки, является ориентированный граф (рис.2), вершины которого (S1 – S26) – события и выполняемые действия, дуги (r1 – r46) – реакции пользователя, определяющие последовательность расчета в каждом конкретном случае. Граф позволяет наглядно представить последовательность обработки в зависимости от вводимых пользователем параметров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовав математическую модель расчета суммарной погрешности обработки, проанализировав информацию, необходимую для ее расчета, была разработана автоматизированная система расчета суммарной погрешности обработки «ЕХАСТ-1». Инструментальным средством для создания АСРСПО

«ЕХАСТ-1» была использована система визуального проектирования Delphi с удобным графическим интерфейсом.

Автоматизированная система расчета суммарной погрешности обработки внедрена в учебный процесс при изучении дисциплины «Технология машиностроения». Использовать АСРСПО «ЕХАСТ-1» для автоматизации расчета суммарной погрешности обработки могут студенты в курсовых и дипломных работах, а также пользователи - технологи.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дипломное проектирование по технологии машиностроения. Под общей ред. Бабука В.В. – Мн.: Вышэйшая школа, 1979. – 464 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.
3. Фаронов В.В. Delphi. Программирование на языке высокого уровня. – СПб.: Питер, 2003. – 640 с.
4. Зелкович М., Шоу А., Гэннон Дж. Принципы разработки программного обеспечения. – М.: Мир, 1982. – 368 с.
5. Информатика. Учебник. – Под ред. проф. Н.В. Макаровой. – 2-е изд. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 768 с.

УДК 621.762

*Белоцерковский М.А.*

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ АКТИВИРОВАННОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Для разработки технологических приемов управления свойствами и структурой покрытий, полученных методами газотермического и, в частности, газопламенного напыления (ГПН) порошковыми или проволоочными материалами необходимо иметь данные о теплофизических параметрах факела термораспылителя и о максимально возможном количестве материала, которое этот факел способен напылить (распылить) в единицу времени. Поскольку экспериментальным путем определение оптимальной производительности напыления для каждого из наносимых в виде покрытий материалов представляет достаточно трудоемкую задачу, предлагается расчетно-экспериментальная методика, апробированная на оборудовании, созданном в ИМИНМАШ НАН Беларуси для активированного газопламенного напыления полимерных порошков и активированного распыления проволоочных материалов [1,2].

В «классическом» варианте реализации ГПН порошковых материалов нагрев частиц пламенем происходит преимущественно за счет конвекции и лучевого теплообмена между потоком горящих газов и соприкасающимся с ними участком поверхности напыляемого материала. Доля тепла, передаваемого радиацией или лучеиспусканием, в общем теплообмене невелика и составляет не более 10...15% от всего количества тепла [3]. Интенсивность вынужденного конвективного теплообмена в основном зависит от разности температур пламени и нагреваемой поверхности, а также от скорости взаимного перемещения потока газов пламени и частиц. Чем больше разность температур пламени и нагреваемой поверхности тем интенсивней конвективный теплообмен. В общем виде удельный тепловой поток пламени, т.е. количество теплоты, вводимой пламенем в единицу времени через единицу площади нагреваемой поверхности, выражается известной формулой Ньютона [3]

$$q = \alpha (T_{\text{плам}} - T_{\text{матер}})$$

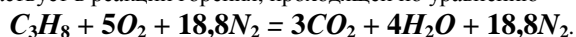
где:  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между пламенем и мате-

риалом, равный сумме коэффициентов вынужденного конвективного теплообмена  $\alpha_k$  и лучевого теплообмена  $\alpha_l$  в Дж/м<sup>2</sup>·с·град.;  $T_{\text{плам}}$  – температура потока газов пламени, К;  $T_{\text{матер}}$  – температура поверхности материала, омываемого потоком газов пламени, К.

Чем больше коэффициент теплообмена  $\alpha$  и разность температур пламени и нагреваемой поверхности материала, тем больше удельный поток теплоты  $q$ . Следовательно, производительность процесса нагрева тела газовым пламенем можно определять двумя основными факторами: температурой продуктов сгорания в факеле пламени и скоростью их потока [4].

Температура продуктов сгорания является функцией состава горючей смеси и условий ее сжигания. Скорость газового потока продуктов сгорания в основном зависит от температуры потока и условий сжигания смеси. Для заданного состава смеси производительность процесса нагрева газовым пламенем зависит только от скорости потока продуктов сгорания, т.е. от условий сжигания горючей смеси.

При теплотехнических расчетах для установки полимерной термораспылительной [1] полагают, что весь кислород воздуха участвует в реакции горения, проходящей по уравнению



При сгорании 1 моля пропана образуется 3 моля  $CO_2$ , 4 моля  $H_2O$  и 18,8 молей азота. Для сгорания 1 моля пропана требуется 5 молей кислорода или  $5 \cdot 100/21 = 23,8$  моля воздуха. Исходя из этого были выбраны следующие расходы рабочих газов: пропан – 1,09...1,15 м<sup>3</sup>/ч; воздух – 23...25 м<sup>3</sup>/ч. Выбранные режимы обеспечивали устойчивое горение при максимальной скорости продуктов сгорания.

Поскольку в дальнейшем состав горючей смеси и условия горения не менялись, экспериментально исследовались тепловые характеристики факела полимерной термораспылительной установки, необходимые для расчета максимально возможной производительности процесса.

*Белоцерковский М.А., к.т.н., Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, г. Минск.*

Как правило, исследование свойств нагретых газовых потоков проводят с помощью зондов различного типа. В данной работе исследование выполнялись с использованием калориметрического зонда методом [5, 6], позволяющей определить теплоэнергетические параметры многоструйного источника тепловой энергии.

При этом в начале нагрева зонда его температура изменяется с некоторым ускорением за время

$$\tau_1 = \frac{0,3l_3^2}{a_3}, \quad (1)$$

где  $l_3$  – длина зонда, м;  $a_3$  – коэффициент температуропроводности материала зонда, м<sup>2</sup>/с.

Затем при установившемся тепловом потоке изменение температуры происходит по линейному закону до начала плавления лицевого торца зонда. В момент плавления повышение температуры замедляется, и прирост ее стремится к нулю.

В работе [6] предложено выражение для описания изменения температуры по оси зонда

$$T = \frac{\Phi\tau}{\rho_3 c_3 l_3} + \frac{\Phi l_3}{\lambda_3} \frac{3x^2 - l_3^2}{6l_3^2}, \quad (2)$$

где  $\rho_3$  – плотность материала зонда, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время взаимодействия, с;  $c_3$  – удельная теплоемкость материала зонда, Дж/кгК;  $\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности материала зонда, Вт/(м·К).  $x$  – текущая координата, м,  $\Phi$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

Дифференцируя уравнение (2) по времени  $\tau$ , получили значение плотности теплового потока

$$\Phi = \rho_3 c_3 l_3 \frac{dT}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $\frac{dT}{d\tau}$  – изменение температуры зонда по времени на линейном участке осциллограммы.

По измеренным  $\frac{dT}{d\tau}$  на линейных участках осциллограмм, полученных в ходе экспериментов, рассчитывалась плотность теплового потока в различных точках вдоль оси и по радиусу сечения пламени. В тех же точках пламени измерялось динамическое давление газов (давление торможения) с помощью трубки Пито и жидкостного тягонапоромера.

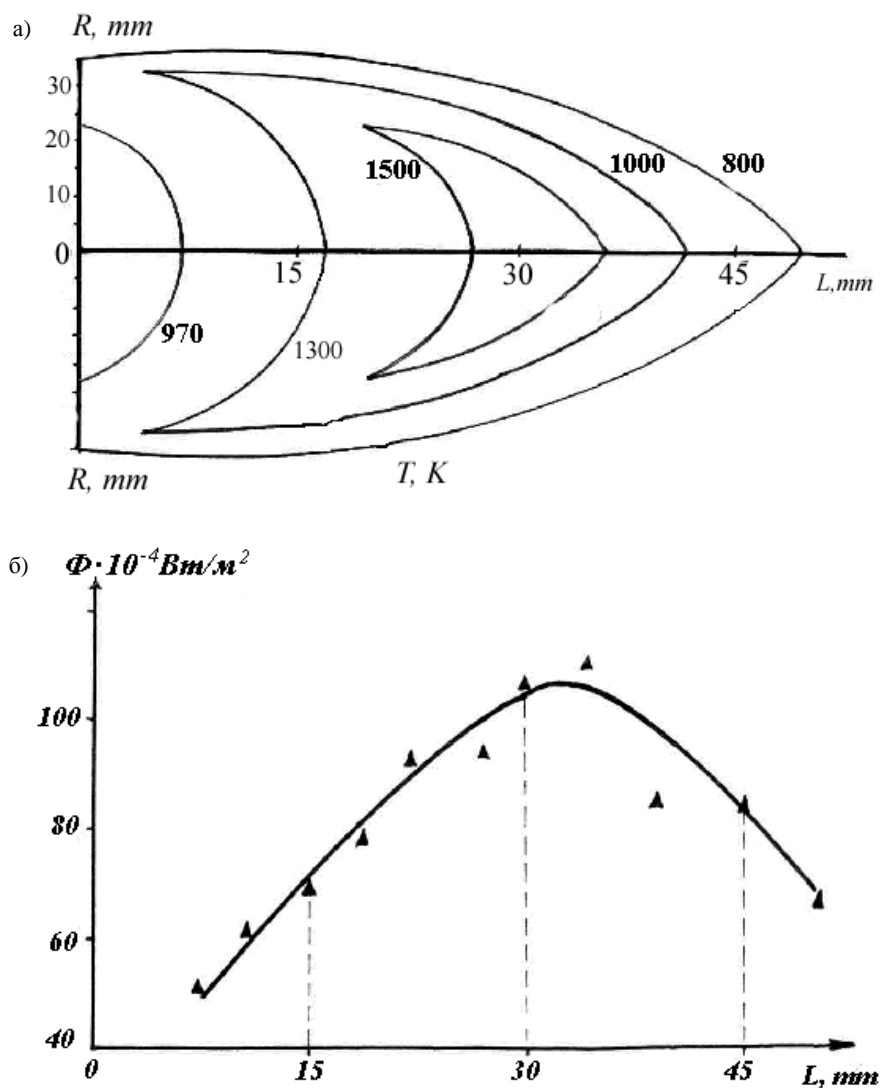


Рис. 1. Температурные поля факела пламени термораспылителя (а) и поверхностная плотность теплового потока по оси факела (б)

При определении энтальпии пламени использовалась формула Фей-Риддела [3], которая авторами работы [6] преобразована следующим образом

$$\Phi = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot r_3^{-5} \cdot P_0^{0,25} \cdot (P_0 - P_\infty)^{0,25} \cdot (H_0 - H_\omega) \quad (4)$$

где  $P_0$  – давление торможения, Н/м<sup>2</sup>;  $P_\infty$  – давление на бесконечном расстоянии (атмосферное), Н/м<sup>2</sup>;  $H_0$  и  $H_\omega$  – соответственно удельная энтальпия торможения и энтальпия в пограничном слое, Дж/кг;  $r_3$  – радиус закругления обтекания зонда, м.

Подставляя в выражение (4) значения плотности теплового потока, определенные экспериментальным путём, было получено распределение энтальпии по радиусу сечения пламени на различных расстояниях от сопла термораспылителя. Используя данные работ [4-6], по рассчитанной энтальпии определялась температура пламени. На основании полученных данных построены графики изменения поверхностной плотности теплового потока вдоль оси факела пламени (рис. 1 б) и поля температур (рис. 1а).

Максимальные значения поверхностной плотности теплового потока и температуры достигаются на расстоянии 33...36 мм от среза сопла и составляют соответственно  $110 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и 1530 К.

Тепловой поток, проходящий сквозь границу раздела двух фаз при наличии на ней температурного скачка  $\Delta T$ , определяется формулой [3]

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha \Delta T S, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи, зависящий от условий на границе раздела, в частности, на границе контакта проволоки с факелом пламени, Дж/с·м<sup>2</sup>·град;  $S$  – площадь поперечного сечения потока, м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  – перепад температур, град.

Используя эти данные, определили коэффициент теплопередачи как  $\alpha = \frac{\Phi}{\Delta T}$  и получили  $\alpha_{max} \approx 800$  Дж/с·м<sup>2</sup>·град.

Определение производительности процесса напыления полимерных материалов представляет собой нахождение оптимальных значений количества порошка, подаваемого в факел, в единицу времени.

Для расчета рациональной производительности напыления полимерных порошков были приняты следующие допущения: а) поток диаметром 3 мм частиц, вылетающий из сопла, представим в виде движущегося монолитного полимерного стержня диаметром 2 мм (учитываем пустоты в потоке) с определенными теплофизическими характеристиками; б) изменение геометрических параметров потока полимерных частиц, выходящих из сопла, не приводит к изменению тепловых характеристик факела; в) температурный перепад внутри потока частиц пренебрежимо мал по сравнению с температурным напором; г) теплофизические характеристики потока частиц полимера не меняются с повышением температуры; д)  $\alpha = \alpha(x)$ ; е) тепло, идущее на перегрев расплавленного полимера, не учитывается.

На участке  $l_1 + l_2$  (рис.2) поток частиц при перемещении сначала нагревается до температуры плавления  $T_m$  и далее летят расплавленные частицы. Следовательно, в любой точке на участке  $l_1 + l_2$  теплообменный источник за время  $d\tau$  отдает потоку с температурой  $T_o$  количество тепла

$$q = \alpha(x)(T_n - T_o) \pi d_1 dx d\tau, \quad (6)$$

где  $T_n$  – температура пламени, К;  $d_1$  – диаметр потока, м.

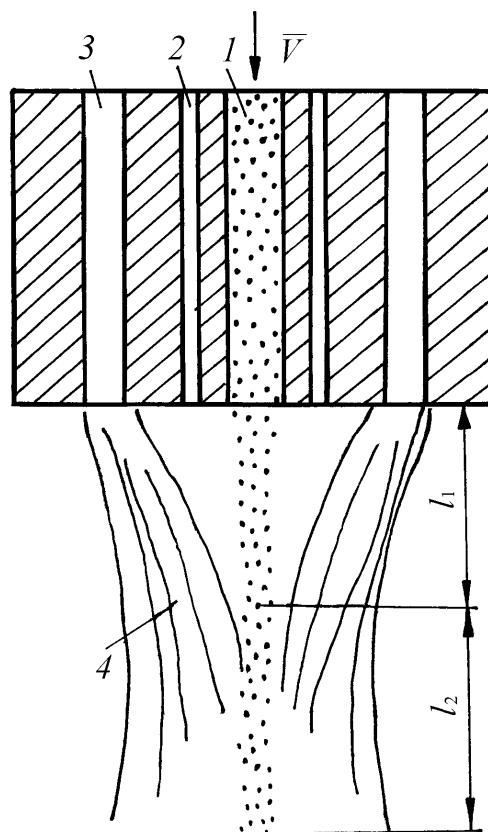


Рис. 2. Схема процесса напыления полимерного порошка: 1 – порошок; 2 – каналы для подвода горючей смеси; 3 – каналы для подвода воздуха; 4 – факел пламени

Порошковый поток за время  $d\tau$  получает количество тепла

$$q = \rho C d V dT, \quad (7)$$

где  $\rho$ ,  $C$  – удельная масса (кг/м<sup>3</sup>); и удельная теплоемкость (Дж/кг·град.) материала полимерного порошка соответственно.

Поскольку теплопроводность вдоль оси потока незначительна, то  $q_1 = q_2$  или:

$$\alpha(x)(T_n - T_o) \pi d_1 dx d\tau = \rho C d V dT \quad (8)$$

Учитывая, что  $dV = \frac{dx \pi d_1^2}{4}$ , получаем

$$4\alpha(x)(T_n - T_o) d\tau = \rho C d_1 dT \quad (9)$$

Линейная скорость перемещения потока  $v$  определяется как  $v = \frac{dx}{d\tau}$ , откуда  $d\tau = \frac{dx}{v}$ , и формула (9) может быть переписана в виде

$$4\alpha(x) dx = v \rho C d_1 \frac{dT}{T_n - T_o} \quad (10)$$

Определим пределы интегрирования, исходя из того, что поток нагреваем от температуры окружающей среды до температуры плавления полимера  $T_m$ .

Интегрируя  $\alpha(x)$  на участке  $l_1$ , на котором происходит нагрев полимера до температуры плавления, получим

$$v = \frac{4 \int_0^{l_1} \alpha(x) dx}{\rho C d_1 \ln \frac{T_n - T_0}{T_n - T_m}} \quad (11)$$

Рассматриваем дальнейший нагрев потока на участке  $l_2$ . В этом случае температура потока будет постоянной и равной  $T_m$ , т.к. тепло, отдаваемое пламенем потоку, будет расходоваться на изменение агрегатного состояния полимера, тогда (по аналогии с (8)) получаем

$$\alpha(x)(T_n - T_m) \pi d_1 dx d\tau = \frac{\pi d_1^2}{4} dx \rho dq, \quad (12)$$

где  $dq$  - накопление теплоты плавления за время  $d\tau$ .

Далее

$$4\alpha(x)(T_n - T_m)d\tau = d_1 \rho dq$$

или  $4\alpha(x)(T_n - T_m)dx = v \rho d_1 dq \quad (13)$

Интегрируя (9), получаем

$$\int_{l_1}^{l_1+l_2} \alpha(x) dx = \frac{v \rho d_1}{4(T_n - T_m)} \lambda, \quad (14)$$

где  $\lambda$  - удельная теплота плавления полимера, Дж/кг.

Перепишем формулу (11) в виде

$$\int_0^{l_1} \alpha(x) dx = \frac{\rho v C d_1 \ln \frac{T_n - T_0}{T_n - T_m}}{4} \text{ и сложим с формулой (14)}$$

$$\int_0^{l_1} \alpha(x) dx + \int_{l_1}^{l_1+l_2} \alpha(x) dx = \int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx. \quad (15)$$

Откуда после преобразований получим

$$v = \frac{4 \int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx}{\rho C d_1 \ln \frac{T_n - T_0}{T_n - T_m} + \frac{\rho d_1 \lambda}{T_n - T_m}}. \quad (16)$$

Производительность процесса напыления определяется как

$$G_N = \frac{m_N}{\tau_N} = v \rho \frac{\pi d^2}{4}, \quad (17)$$

где  $G_N$  - производительность, кг/ч;  $m_N$  - масса полимерного порошка (кг), напыленного за время  $\tau_N$  (ч).

Подставляя в уравнение (17) значения скорости из (16), получаем

$$G_N = \frac{\pi d \int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx}{C \ln \frac{T_n - T_0}{T_n - T_m} + \frac{\lambda}{T_n - T_m}}. \quad (18)$$

Величину  $\int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx$  определили графическим инте-

грированием функции  $\alpha = \alpha(x)$ , построенной по экспериментальным данным. Для данной конструкции сопла полимерного термораспылителя, заданных расходов горючего газа и воздуха эта величина составляет  $\approx 24$  кДж·мм/с·м<sup>2</sup>·град.

Подставив числовые значения величин, входящих в уравнение (18), получили производительность  $G_N = 1,4$  кг/ч. Если допустить, что поток частиц, вылетающий из сопла, можно представить в виде движущегося монолитного полимерного стержня диаметром не 2 мм, а только 1,5 мм, величина производительности составит  $G_N$  около 1 кг/ч. Таким образом, данная конструкция термораспылителя может обеспечить за 1 час качественное напыление полимерного покрытия площадью до 6,2 м<sup>2</sup> при толщине слоя 300 мкм.

Аналогичным образом было определено распределение температуры и плотности теплового потока по оси пламени проволочного термораспылителя «Терко» [2], при этом максимальный коэффициент теплопередачи составил  $\alpha_{\max} \approx 3570$  Дж/с·м<sup>2</sup>·град.

Определение производительности процесса напыления проволочных материалов представляет собой нахождение оптимальных значений скорости подачи проволок в зону распыления. Для расчета скорости подачи проволоки в факел пламени термораспылителя были также приняты допущения: а) изменение диаметра проволоки не приводит к изменению тепловых характеристик факела; б) температурный перепад внутри проволоки пренебрежимо мал по сравнению с температурным напором; в) теплофизические характеристики металла проволоки не меняются с повышением температуры; г)  $\alpha = \alpha(x)$ ; д) тепло, идущее на перегрев расплавленного металла, не учитывается.

Величина  $\int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx$  для термораспылителя «Терко»

составляет  $\approx 53$  кДж·мм/с·м<sup>2</sup>·град.

В таблице 1 приведены значения скорости подачи проволок диаметром 2 мм из различных материалов, полученные расчетным путем и установленные в ходе экспериментальных исследований (критерием являлись плотность покрытий и прочность сцепления с основой).

Таблица 1. Данные к расчету скорости подачи проволок диаметром 2 мм

Напыляемый металл	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_m$ , К	$C$ , Дж/кг·град	$\lambda$ , Дж/кг	$v$ , мм/с	
					расчет	эксперимент
Алюминий	270	933	880	380000	94,6	100
Медь	8930	1356	390	210000	38,9	44
Сталь Х18Н10Т	7850	1760	500	205000	24,9	27
Молибден	9010	2898	248	288000	5,1	8

Более высокие скорости проволоки в экспериментах, по сравнению с расчетными значениями, свидетельствуют о том, что реальная поверхностная плотность теплового потока несколько выше, чем определенная с помощью калориметрического зонда.

Таким образом, экспериментально определены теплофизические параметры факелов установок активированного газопламенного напыления порошковых и проволочных материалов. Используя полученные данные расчетным путем найдены значения максимальной производительности процесса ГПН при напылении порошков полимеров и распылении проволок из различных металлов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоцерковский М.А., Федаравичус А.В. Разработка технических средств для газопламенного напыления полимерных покрытий // Машиностроитель. – 2002. - №12. – С.13-15.

2. Белоцерковский М.А. Восстановление деталей методом активированного газопламенного напыления // Тяжелое машиностроение. – 2004. - №2. – С. 38-41.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия. -1969. – 440 с.
4. Иванов Е.М., Углов А.А., Усов В.Ф. Нагрев сферических частиц в высокотемпературном газовом потоке // Физика и химия обработки материалов. – 1993. - № 3. – С. 77-86.
5. Дорожкин Н.Н., Шипай А.К., Белоцерковский М.А. Исследование температурных характеристик газового пламени // Достижения в области технологии газотермических покрытий и методов их диагностики: Труды конф. – Апатиты, 1989. – С. 99-107.
6. Сергеев В.А., Безладнов Г.М., Ляшкевич В.Д. Экспериментальное исследование нагрева затупленных тел потоком плазмы // Инженерно-физический журнал. – 1971. Т. XX. – № 4. – С. 49-54.

УДК 621.793.6:785.5

*Хвиевич В.М., Сазонов М.И., Якушевич С.*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ 45 И 40Х ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Плазменные технологии относятся к разряду наиболее перспективных и в настоящее время интенсивно разрабатываются. Исследования и практика их применения показали, что плазменный источник нагрева эффективно может применяться наряду с лазерным и электронно-лучевым источниками, обеспечивая высокую эффективность процесса. Такие источники нагрева с высокой плотностью мощности позволяют осуществлять поверхностную закалку изделий, сущность которой заключается в фазовых и структурных превращениях при скоростном концентрированном нагреве поверхности и теплоотводе в материал детали. В результате значительных скоростей нагрева и охлаждения получают поверхностные слои с более высоким уровнем эксплуатационных свойств по сравнению с традиционными методами упрочнения (печная и газопламенная закалки, закалка ТВЧ и др.), т.е. осуществляется поверхностная плазменная закалка (ППЗ).

#### Материал и методика

Для поверхностной плазменной закалки (ППЗ) стальных изделий создана плазменная установка с модернизированным плазмотроном, который генерирует плазменную струю с плотностью теплового потока  $2,5 \cdot 10^7 - 6,0 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (плазмобразующий газ – аргон, защитный газ – аргон или азот).

Исследования проводили на образцах изготовленных из среднеуглеродистой стали 45 (0,45 % С; 0,25 % Si; 0,6 % Mn) и среднеуглеродистой низколегированной стали 40Х (0,42 % С; 0,25 % Si; 0,6 % Mn; 1,1 % Cr; 0,3 % Ni; 0,2 % W). Плазменную обработку стали 45 осуществляли по пяти технологическим вариантам, варьируя скоростью движения источника  $V$ , ( $V = 4,2$  мм/с,  $V = 11,7$  мм/с,  $V = 13,36$  мм/с,  $V = 16,7$  мм/с,  $V = 20$  мм/с) при токе дуги  $I = 24$  А, расходе плазмобразующего газа  $Q_{Ar} = 18$  л/мин; защитных газов  $Q_{Ar} = 3,2$  л/мин;  $Q_{N_2} = 3,38$  л/мин. Микростроение металла в зоне воздействия плазменной струи изучали металлографическим методом с

помощью приборной системы НЕОРНОТ – 21. Травление шлифов осуществляли в 3 %-ом спиртовом растворе HNO<sub>3</sub>. Микротвердость по глубине зоны воздействия струи определяли по Виккерсу при нагрузке 0,981 Н (HV<sub>0,1</sub>). Фазовый состав стали анализировали с помощью дифрактометра Philips PW 1830.

За критерии оценки механических свойств обработанного поверхностного слоя принимали значения микротвердости.

#### Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных нами экспериментов по поверхностной плазменной закалке образцов из стали 45 удовлетворительно совпали с результатами работы [1]. Применяя плазмобразующий газ аргон и защитный - азот соответственно с расходами 1,8 и 3,3 л/мин при упрочнении из жидкого состояния с оплавлением поверхности микротвердость достигает до 1300 HV<sub>01</sub> (исходная 290 HV<sub>01</sub>) а при упрочнении из твердой фазы - 950 HV<sub>01</sub>. Очевидно это объясняется тем, что поверхностный слой нагревается в последнем случае до меньшей температуры. В связи с этим углерод не успевает выделяться из труднорастворимых соединений и концентрация его в аустените снижается.

Плазменное упрочнение с оплавлением привело к повышению микротвердости стали, однако, при этом уменьшилась ее ударная вязкость [2]. Мартенситная микроструктура оплавленной зоны имеет столбчатый характер. Выявлено, что в структуре оплавленной зоны имеется повышенное содержание аустенита. При оплавлении изменяется не только микротвердость и дисперсность мартенсита, но и характер разрушения стали. В оплавленной зоне разрушение происходит по границам зерен. Этот факт можно объяснить ростом зерна в связи с перегревом жидкого металла оплавленной зоны [3].

Следует заметить, что при использовании азота наблюдается больший рост твердости стали. В работе [4] высказано предположение, что при использовании азота в качестве за-

*Хвиевич Виталий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. каф. сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.*

*Сазонов Михаил Иванович, д.т.н., профессор, каф. сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

*Якушевич Сергей, директор предприятия по производству технологического оснащения Белостокского технического университета, Польша.*