

*д.т.н., проф. Дзюба В.Л.,  
к.т.н., доц. Корсунов К.А.  
(ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина),  
к.т.н., доц. Сергиенко С.Н.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ПЛАЗМЕННО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ**

*Наведені результати досліджень щодо створення електродугового плазмотрона та керуючого обчислювального комплексу для плазмово-механічної обробки матеріалів.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Применение жаропрочных сталей и сплавов для изготовления различного рода машин и механизмов создает большие трудности при обработке их резанием. Решение проблемы обработки жаропрочных сталей и сплавов на металлорежущих станках может развиваться в двух направлениях:

- путем создания новых, более прочных и износоустойчивых режущих материалов, дающих возможность значительно повысить стойкость резцов при обычных методах резания;
- разработкой новых способов резания, позволяющих повысить производительность при использовании существующих инструментальных материалов.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ результатов существующих методов обработки резанием высоколегированных специальных сталей и сплавов (жаропрочных, магнитных, нержавеющей и др.) показал, что их целесообразно обрабатывать в нагретом до высоких температур состоянии. Из всех известных методов предварительного нагрева наиболее эффективным является плазменный нагрев, который позволяет чрезвычайно быстро не только нагревать заготовки на значительную глубину, но и удалять часть срезаемого металла без участия режущего инструмента. Преимущество плазменно-механической обработки (ПМО) в сравнении с обычными методами обработки приведены в табл. 1 [1], откуда видно, что удельный съем металла при ПМО в среднем возрастает в 3-6 раз. Целый ряд публикаций указывает, что ПМО не только решает проблему обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов, но и позволяет снизить затраты на электроэнергию, инструмент и оборудование.

Таблица 1 – Режимы обработки различных материалов

Обрабатываемый материал	ПМО						Без ПМО			
	I, А	U, В	V, м/мин	t, мм	S, мм/об	v, см <sup>3</sup> /мин	V, м/мин	t, мм	S, мм/об	v, см <sup>3</sup> /мин
<b>22КВД</b>	250	160	30	15	2,5	1125	8	15	1,6	193
<b>10ГН2МФА</b>	250	150	25	15	2,5	940	6	15	1,6	144
<b>08Х18Н10Т</b>	250	150	34,5	15	2,5	1300	11	15	1,6	264
<b>ХН67МВТОЛ</b>	300	170	9,63	10	1,5	145	2,38	10	0,5	12
<b>40Х27НЛ</b>	300	180	10,9	10	1,03	112	4,91	10	0,65	32
<b>Наплавки (ЖСН-5)</b>	250	190	28	2,5	1,12	77	Шлифование			18,99
<b>3Х2В8</b>	250	180	24	2,5	1,12	68	Шлифование			17,8

Однако, несмотря на высокую эффективность ПМО, существует ряд проблем, сдерживающих повсеместное применение данного метода:

- при точении жаропрочных сплавов на никелевой основе вследствие чрезмерной концентрации тепла (нагрев производили плазмотроном ПВР-402У4) срезаемый слой прогревается неравномерно, часть металла расплавляется; при этом стойкость инструмента низкая, так как часть режущей кромки контактирует с перегретым металлом, а часть с недогретым, появляются дефекты поверхностного слоя в виде трещин и микротрещин;

- плазменный источник тепла должен способствовать быстрому подъему температуры металла впереди режущего лезвия, легко ее контролировать и регулировать в широком диапазоне;

- отсутствие опыта использования плазменного подогрева при резании на получистовых и чистовых режимах, для которых характерны большие скорости резания и низкие значения подачи и глубины резания;

- в зависимости от назначения обработки (черновой, получистовой и чистовой) плазмотроны типа ПВР-402У4 требуют не только изменения расстояния до обрабатываемой поверхности, но и диаметра сопла. При уменьшении диаметра сопла до 2 мм увеличивается коэффициент сосредоточенности и возрастает локальность нагрева, что позволяет производить получистовую обработку с глубиной 2-3 мм. Увеличение диаметра сопла до 8 мм снижает коэффициент сосредоточенности и обеспечивает более равномерный нагрев широких сечений срезов, имеющих место при черновой обработке с глубиной резания 15-20 мм;

- для сохранения исходных характеристик и высоких эксплуатационных свойств обрабатываемого материала нагревать слои до температуры свыше 700°C недопустимо, так как при этом исходная структура сорбита, ориентированного по мартенситу, изменяется: появляются участки точечного сорбита и бейнита;

- при плазменном нагреве обрабатываемых деталей необходимо подбирать такие режимы, при которых большая часть тепла, поступающего в деталь, уносится со стружкой, что предотвращает изменение микроструктуры металла.

Частичное решение указанных проблем при ПМО нами было осуществлено за счет создания более эффективного плазменного источника нагрева (плазмотрона) и разработки информационно-управляющего вычислительного комплекса, который позволял управлять режимами работы плазмотрона (регулировать температуру нагрева поверхности заготовки) с учетом технологического процесса резания, автоматически стабилизируя заданные силы резания (рис. 1).

На схеме управляющий плазмотроном комплекс (УКП) изображен блоком 1. Выходным параметром его является тепловой поток ( $q$ ), получаемый изделием в единицу времени в блоке 2 и связывающий его с температурой предварительного подогрева непосредственно перед режущим инструментом. Передаточная функция этих звеньев выражается формулой:

$$W = \frac{T(p)}{q(p)} = K \exp\{-\tau p\}, \quad (1)$$

$$\text{где } K = \frac{1}{2\pi\lambda V \sqrt{\frac{L}{V} \left( \frac{d^2}{16a} + \frac{L}{V} \right)}} \exp\left\{ -\frac{z^2 V}{4aL} - \frac{y^2}{\frac{d^2}{4} + \frac{4aL}{V}} \right\};$$

$\exp\{-\tau p\}$  – величина запаздывания системы автоматического регулирования на время  $\tau = \frac{L}{V}$ , т.е. время изменения температуры изделия, вызванное изменением теплового потока;

$p$  – оператор Лапласа;

$V$  – скорость обработки;

$L$  – расстояние от сопла плазмотрона до детали;

$a$  – коэффициент температуропроводности;  $d$  – диаметр сопла плазмотрона.

Сигнал с выхода блока 2 суммируется (алгебраически) с выходом блока 7, связывающим температуру предварительного подогрева со скоростью обработки. Предварительная функция этого звена выражается формулой:

$$W = \frac{T(p)}{\Delta V(p)} = -K_1 \exp\{-\tau p\}, \quad (2)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{q}{V_H^2} K_2, \quad K_2 = \frac{1}{2\pi\lambda \sqrt{\frac{L}{V} \left( \frac{d^2}{16a} + \frac{L}{V} \right)}} \exp\left\{ -\frac{z^2 V}{4aL} - \frac{y^2}{\frac{d^2}{4} + \frac{4aL}{V}} \right\}.$$

Блок 3 связывает усилия резания с температурой предварительного подогрева:

$$W_T = \frac{\Delta F(p)}{\Delta T(p)} = K_T, \quad (3)$$

где  $K_T = -zCS^x t^y T_H^{-z-1}$ ,

$C, x, y$  - постоянные, определяемые опытным путем.

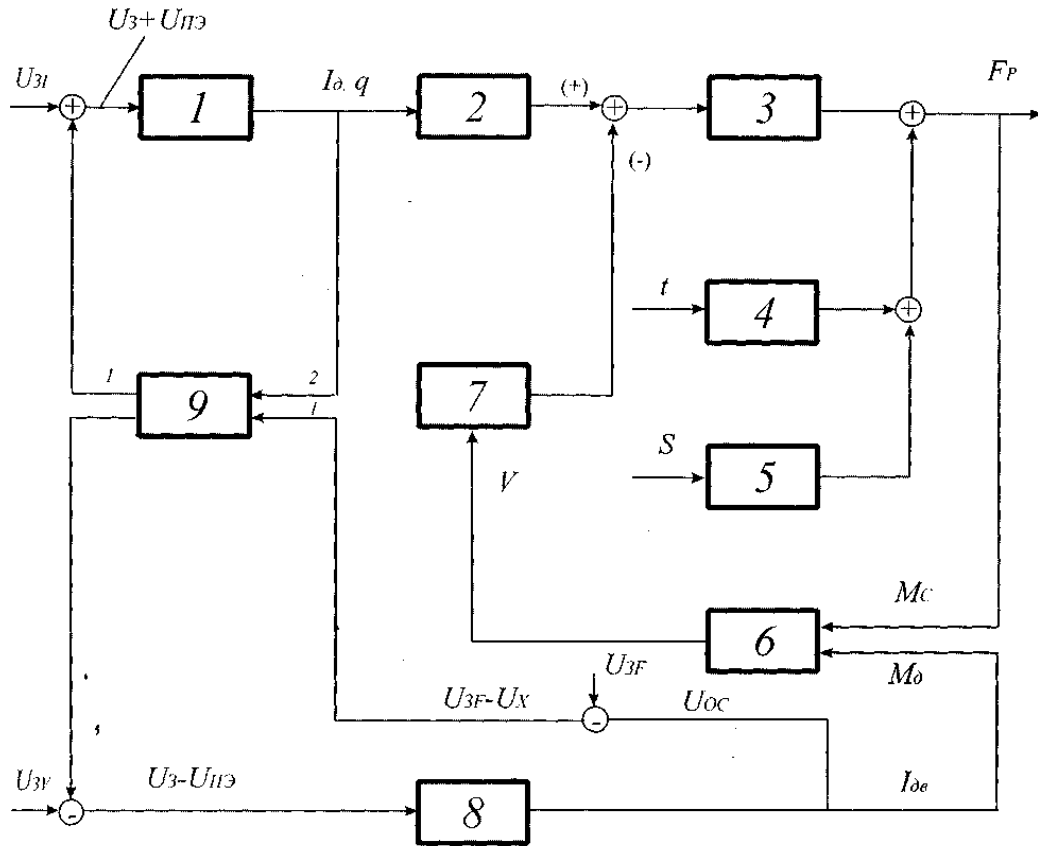


Рисунок 1 – Структурная схема автоматического управления процессом ПМО

Возмущающими параметрами системы являются глубина резания (блок 4) и подача (блок 5). Выражение для передаточных функций этих звеньев имеет вид:

$$W_T = \frac{\Delta F(p)}{\Delta t} = \frac{K_T}{T_1 p_t + 1}, \quad (4)$$

где  $K_T = yCS^x t^{y-1} T^t$ , и

$$W_s = \frac{K_s}{T_s(p) + 1}, \quad (5)$$

где  $K_T = xCS^{x-1} t^y T^{-z}$ .

В (4) и (5) учтено, что сила резания отстает по фазе от изменения толщины срезаемого слоя и зависимость усилий резания выражается апериодическим звеном с постоянными времени  $T_i$  и  $T_s$  [2].

Усилия резания  $F_p$  создают на валу планшайбы станка момент сопротивления  $M_c$ , который через редуктор станка окажет влияние на силу тока главного привода. Блок 6 выражает связь между разностью момента сопротивления и момента на валу двигателя  $M_d$  и скоростью вращения планшайбы. Источник питания двигателя главного привода изображен блоком 8.

Перед началом обработки задается начальный ток плазменной дуги (плазмотрона)  $U_{3l}$ , глубина резания  $t$ , подача  $S$ , усилия резания  $U_{3F}$ , скорость обработки  $V_3$ , максимально допустимый ток плазменной дуги  $I_{dmax}$ . Если в процессе обработки усилия резания равны заданным ( $F_p = F_{pz}$ ), то сигнал задания  $F_{pz}$  будет равен сигналу датчика тока двигателя и на первый вход порогового элемента (ПЭ) блока 9 сигнал поступать не будет. В этом случае сигналы на обоих выходах блока 8 также будут отсутствовать. Ток плазменной дуги и скорость обработки будут равны заданным. При возрастании усилий резания возрастает ток двигателя главного привода  $I_{об}$  и сигнал обратной связи ( $U_{oc}$ ) превысит сигнал задания усилий резания и на первом выходе ПЭ появится напряжение, которое, складываясь с  $U_{3l}$ , увеличит ток плазмотрона с таким условием, чтобы усилия резания опять стали равными заданным. При этом может возникнуть такая ситуация, когда сила тока плазмотрона достигнет своего предельного значения, а усилия резания еще превышают заданные. Тогда сигнал с выхода 1 блока 9 перестанет возрастать, но зато появится сигнал на 2-ом выходе этого блока, который вычитается из сигнала задания скорости обработки, вследствие чего последняя уменьшается, что приведет к увеличению температуры подогрева и, как следствие, к снижению усилий резания. Следовательно, с помощью изменения тока плазменной дуги и скорости обработки система управления будет поддерживать усилия резания на заданном уровне.

Разработанный нами для ПМО линейный плазмотрон выполнен двухкамерным с газовихревой стабилизацией дуги (табл. 2). Он состоит из медных водоохлаждаемых внутреннего и выходного электродов, между которыми находится вихревое кольцо для подачи основного расхода рабочего газа. Особенность данного плазмотрона заключается в том, что внутренний полый электрод разделен вихревым кольцом на два самостоятельных участка. В зависимости от технологии обработки электроды плазмотрона подключаются к источнику питания в режиме прямой или обратной полярности (рис. 2). Известно, что при горении дуги в

режимах прямой и обратной полярностях длина дуги изменяется, причем в режиме обратной полярности она длиннее. Это объясняется особенностями процесса шунтирования дуги. В случае прямой полярности подключения выходного электрода положительный столб дуги относительно электрода имеет отрицательный потенциал и электрическое поле в зазоре «дуга-электрод» помогает движению электронов, вылетающих из дуги (являющейся эмиттером электронов) достичь поверхности электрода. В случае обратной полярности подключения, эмиттером служит холодный электрод, в силу этого пробой происходит в более удаленном вниз по потоку сечении, где температура газа выше и тем самым более благоприятны условия для пробоя. Можно также ожидать, что при прямой полярности и постоянном расходе газа с ростом силы тока амплитуда колебаний конца дуги должна уменьшаться, при обратной полярности эта зависимость будет выражена менее ярко. Изменение полярности подключения скажется и на среднем напряжении на дуге, причем при обратной полярности оно должно быть больше. Следовательно, напряжение и мощность дуги будут зависеть от полярности подключения электродов.

Таблица 2 – Основные технические данные плазмотрона для ПМО

Показатели		Параметры
Мощность, кВт		60
Ток дуги, А		400
Расход рабочего газа, г/с		4
Тепловой КПД		0,65-0,85
Температура струи, К		5000
Ресурс работы, ч		100
Геометрические размеры разрядного канала, $10^{-3}$ м	d	15
	d <sub>1</sub>	10-15
	d <sub>2</sub>	5-8
	l	10
	l <sub>1</sub>	15
	l <sub>2</sub>	60

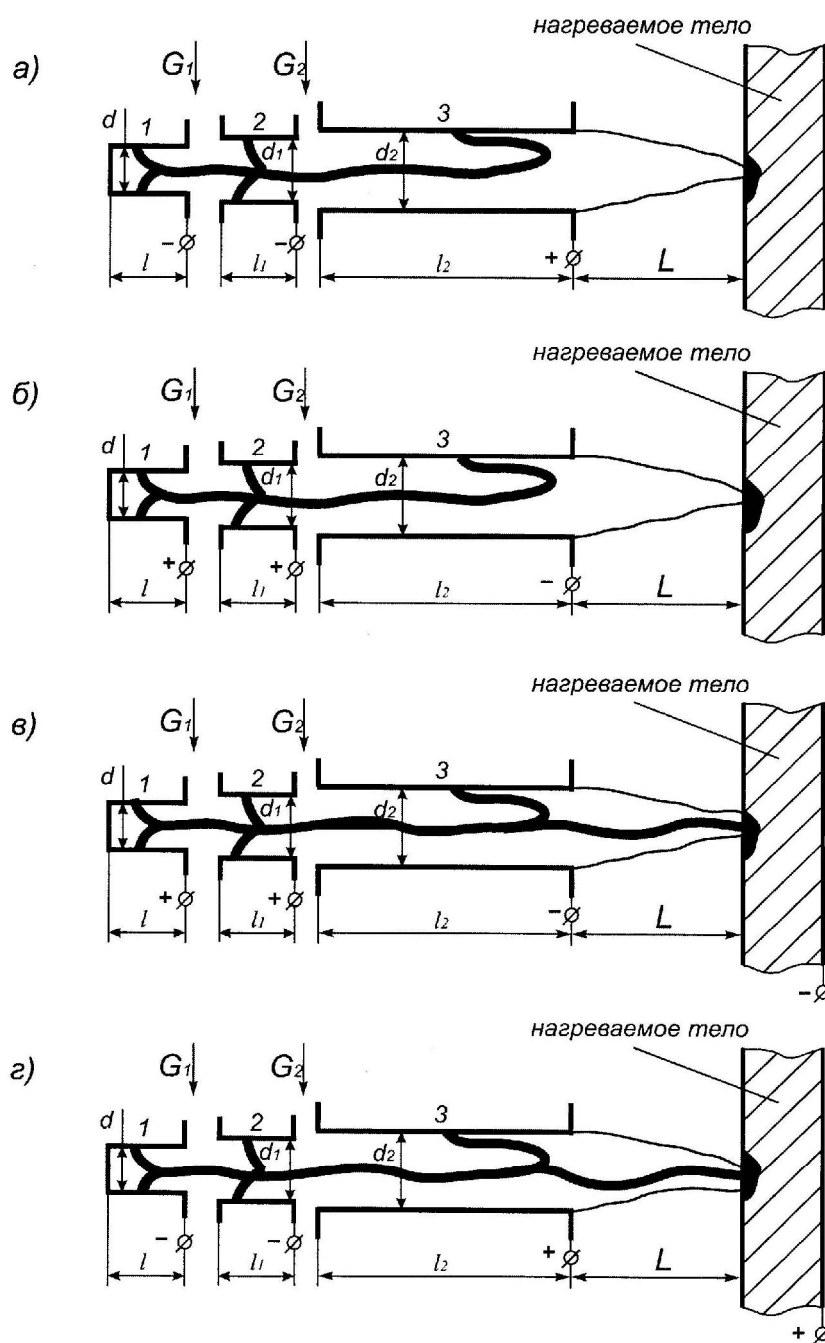


Рисунок 2 – Принципиальные схемы распределения силы тока по длине разрядного канала в системе «источник питания – плазмотрон – обрабатываемый материал»: 1,2 – внутренний электрод; 3 – выходной электрод

Опытная обработка сталей 5ХНМ, 12Х18Н10Т и стали 40 осуществлялась по схеме соединения плазмотрон – источник питания – металл согласно рис. 2 в. В зависимости от диаметра образца необходимый уровень температур (800-850°C) достигался при подогреве срезаемого слоя в течение 3-8 минут без относительного перемещения



плазмотрона в продольном направлении. Дальнейшее термическое воздействие плазменного потока приводило к несущественному повышению температуры образца (~ 20-50°C) и практически стабилизировалась. Температура резания, замеренная на передней грани режущего инструмента, контролировалась оптическими пирометрами ДПР-2 и ДПР-3 и интегрированными термометрами серии «Маратон». Режимы обработки образцов из стали 40, 5ХНМ и 12Х18Н10Т приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Режимы обработки материалов

Обрабатываемый материал	Без нагрева			При ПМО				
	t, мм	S, мм/об	V, м/мин	t, мм	S, мм/об	V, м/мин	I, А	U, В
<b>5ХНМ</b>	2	0,21	15	3	0,52	15	220	180
<b>12Х18Н10Т</b>	2	0,21	20	3	0,52	20	220	180
<b>40</b>	2	0,21	20	3	0,52	30	220	180

**Выводы.** В процессе экспериментов было установлено, что увеличение мощности плазменного потока приводит к прогрессирующему росту температуры. Стойкость резцов с пластинами из твердого сплава Т15К6 увеличивается в 2-3 раза и достигает 60 минут, при этом оптимальные температуры нагрева находятся в диапазоне 620-710°C, дальнейшее ее увеличение приводит к значительному уменьшению стойкости режущего инструмента.

*Приведены результаты исследований по созданию электродугового плазмотрона и управляющего вычислительного комплекса для плазменно-механической обработки материалов.*

*Results of researches on creation of the electric-arc plasma generator and the controlling computer system for plasma-mechanical processing of materials are presented.*

#### **Библиографический список.**

1. *Механическая обработка труднообрабатываемых материалов с нагревом срезаемого слоя плазменной дугой / Б.П. Баринов, Б.Н. Куревич, В.И. Кочкин и др.: Аналитический обзор. – М.: ЦНИИТЭИ, 1979. – 62 с.*
2. *Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.*

*Рекомендовано к печати к.т.н., доц. Заблодским Н.Н.*