

Лекция 5.

1. Характеристики плазмотрона в режиме модуляции тока дуги

В связи с расширением областей применения ЭДП в технологических процессах плазменного напыления и плазменного формообразования, а также в химической промышленности, стали актуальными работы по активизации процессов тепло- и массообмена между потоком дуговой плазмы и технологическими компонентами (напыляемым порошком, химическими реагентами и др.). Одним из методов активизации указанных процессов является метод малых возмущений. Сущность этого метода заключается в возбуждении гармонических колебаний тока заданной амплитуды и частоты в цепи, содержащей электрическую дугу. В данном разделе рассмотрим некоторые результаты экспериментального исследования влияния модуляции тока дуги на характеристики плазмотрона и истекающей плазменной струи.

Нестационарный режим работы ЭДП осуществлялся путем наложения на дугу постоянного тока переменного напряжения заданной амплитуды и частоты от дополнительного источника, включенного параллельно основному источнику электропитания. Источник переменного напряжения состоит из задающего генератора типа ГЗ—34 и трансляционного усилителя типа ТУ—5—4. Цепи по постоянному и переменному току разделены посредством емкостных и индуктивных сопротивлений. С целью снижения пульсаций выпрямленного напряжения основного источника питания в схему включен П-образный LC фильтр, состоящий из батареи электролитических конденсаторов и силового дросселя. Экспериментальная установка позволяет плавно менять эффективное значение тока модуляции от 0 до 50 А, а частоту колебаний от 50 Гц до 20 кГц.

Система измерений и методика определения характеристик плазмотрона позволяла измерять расход газа, постоянные составляющие тока и напряжения дуги, эффективные значения переменных составляющих тока и напряжения дуги и сдвиг фаз между ними. С целью выделения полезного сигнала из спектра частот, генерируемых самой дугой, использовались селективные вольтметры типа В6—9. Переменные составляющие тока и напряжения наблюдались на двухлучевом осциллографе С1—18, а динамическая вольт-амперная характеристика наблюдалась на осциллографе С1—54, сдвиг фаз между током и напряжением измеряли фазометром типа Ф2—13.

В опытах использовался линейный плазмотрон с МЭВ и вихревой стабилизацией дуги, длина РК была 13 см, а радиус 0,5 см.

2. *Влияние модуляции тока дуги на электрические характеристики ЭДП*

В исследованном диапазоне параметров статические вольт-амперные характеристики плазматрона по постоянному току имеют падающий характер и приведены на рис. 6. 4. Как видно, с ростом I напряжение падает, а с ростом расхода газа, при $I = const$, напряжение повышается.

Модуляция тока дуги приводит к увеличению среднего значения напряжения горения дуги. Этот факт ранее был отмечен в работах [56, 69, 70]. Анализ проведенных экспериментов показывает, что при $I_0 = 50$ А, $f = 1$ кГц, $G = 0,4$ г/с увеличение $I_{эф}$ до 40 А ведет к повышению U до 20%. Это является следствием роста E при модуляции тока из-за изменений условий генерации носителей заряда и структуры ПС дуги. Исследования влияния режима модуляции на распределение $E(z)$ показали, что наибольший рост величины E наблюдается на начальном участке канала. Вниз по потоку газа, по мере развития ПС дуги, влияние на ослабевает. Общий характер зависимости $E(z)$ такой же, как и в стационарном режиме.

Изменение структуры ПС дуги в модулированном режиме обусловлено, в первую очередь, изменениями характера тепловыделения в объеме РК.

Известно, что в цепи переменного тока активная мощность энергии электрического поля зависит от сдвига фазы между переменными составляющими тока ДО и напряжения $U(t)$ и определяется по формуле [53].

$$N = I_0 U_0 + I_{эф} * U_{эф} \cos \Delta \varphi, \quad (6.5)$$

поэтому были проведены исследования фазо-частотных характеристик плазматрона (рис. 6. 11—6. 12).

Как и следовало ожидать, при малой частоте колебаний и постоянных значениях $I_{эф}$ и G напряжение горения дуги опережает по фазе ток, т.е. $\Delta \varphi > 0$, с ростом f величина $\Delta \varphi$ уменьшается. Этот факт хорошо известен из опытов с дугой переменного тока и исследований динамических ВАХ плазматронов постоянного тока при больших амплитудах и скоростях изменения тока [56, 71 и др]. Он объясняется тепловой инерционностью плазмы ПС дуги, так как в момент времени когда $U = 0$ электроны продолжают некоторое время направленно

перемещаться, т.е. в цепи существует убывающий со временем электрический ток. С увеличением частоты колебаний питающего напряжения, температура и электропроводность ПС не успевают заметно измениться за период колебания тока, поэтому с ростом величина $\Delta\phi$ стремится к нулю. В условиях, когда $\Delta\phi = 0$, плазму ПС дуги можно рассматривать как чисто активную нагрузку в электрической цепи.

Исследования динамических характеристик ЭДП при модуляции тока показали, что существуют режимы, когда $\Delta\phi < 0$, т.е. напряжение горения дуги отстает по фазе от тока. Этот факт уже нельзя объяснить только термической инерционностью дуги. Здесь следует в комплексе рассматривать наличие в плазме ПС дуги индуктивных и емкостных свойств, степень проявления которых зависит от многих факторов. В разделе 3.5 было показано, как сильно зависят коэффициенты диэлектрической проницаемости и немагнитной индуктивности плазмы от n_e , числа столкновений электронов, частоты колебаний внешнего поля и других факторов.

Как видно из рис. 6.11—6.12, в исследованном диапазоне параметров при $f = const$, в области $\Delta\phi > 0$, увеличение G ведет к росту $\Delta\phi$, не меняя общего характера зависимости $\Delta\phi(I)$. С ростом глубины модуляции $I_{эф}$ сдвиг фазы между током и напряжением возрастает. С ростом частоты $\Delta\phi$ уменьшается, переходит через ноль и далее возрастает. Область перехода сдвига фазы через ноль сильно зависит от расхода газа, величины постоянной и переменной составляющих тока дуги и частоты колебаний. Так, например, при $f = 4$ кГц и $G = 0,2$ г/с при малых значениях $I_{эф}$ величина $\Delta\phi < 0$. При увеличении $I_{эф}$ отставание напряжения от тока убывает, $\Delta\phi$ переходит через ноль и далее изменение тока начинает отставать от изменения напряжения.

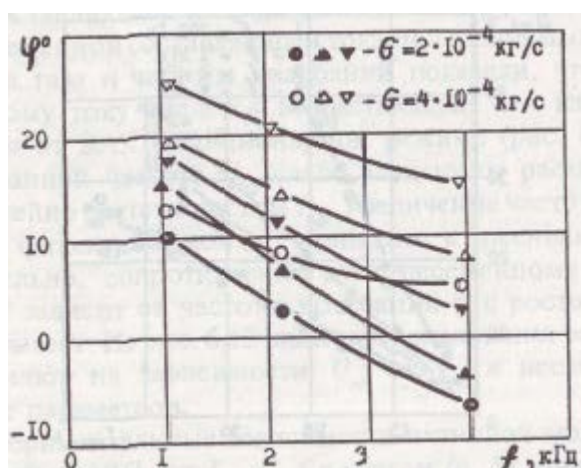
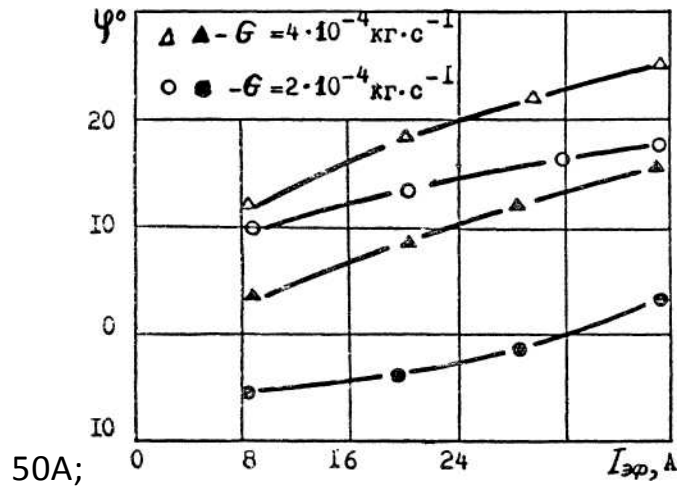
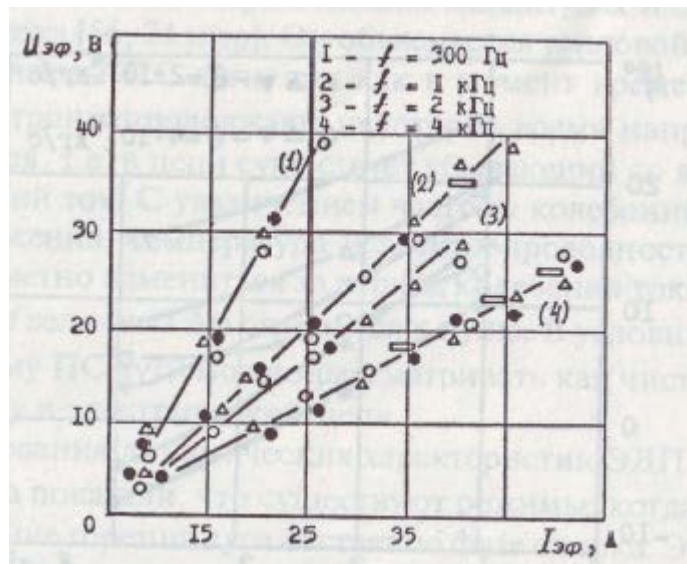


Рис. 6.11. Фазочастотные характеристики ЭДП: $I_0 = 50\text{A}$;Рис. 6.12. Зависимости сдвига фазы от глубины модуляции тока и расхода газа $\bullet, \Delta - f = 1 \text{ кГц}$, $\circ, \Delta - f = 4 \text{ кГц}$, $I_0 = 50 \text{ А}$ [52]Рис. 6.13. Зависимости эффективного значения напряжения дуги от эффективного значения тока: $\circ - G = 0,2 \text{ г/с}$; $\bullet - G = 0,4 \text{ г/с}$; $\Delta - G = 0,6 \text{ г/с}$; $\square - G = 1 \text{ г/с}$; $I_0 = 50 \text{ А} = \text{const}$ [52]

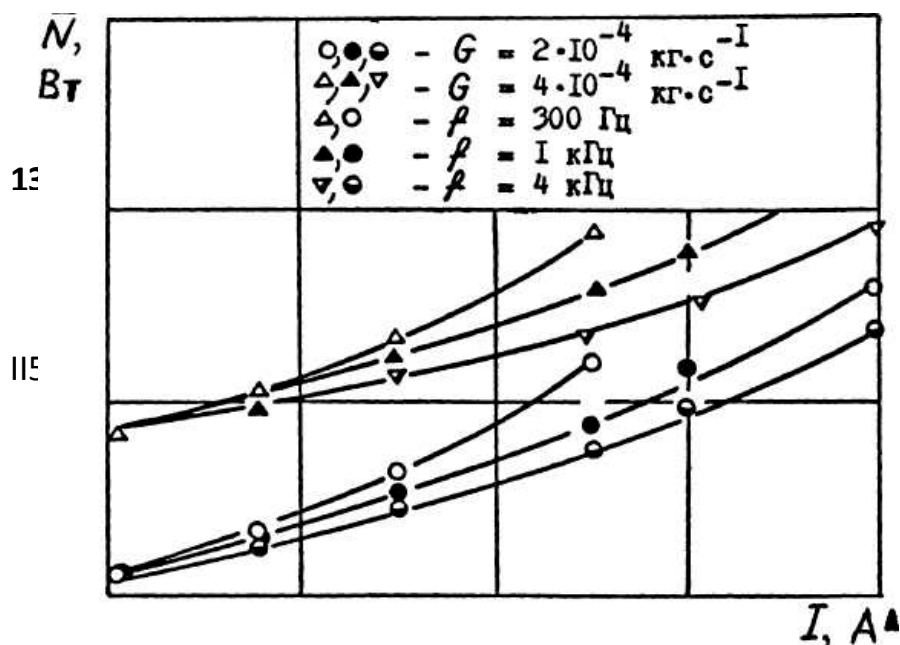


Рис. 6.14. Зависимости активной мощности, выделяемой в плазмотроне от I , f и G ; $I_0 + I_{эф} = 50 \text{ A} = const$

Исследования зависимости эффективного значения переменной составляющей напряжения дуги от эффективного значения переменной составляющей тока при различных значениях расхода газа и частоты колебаний показали, что ВАХ по переменному току является возрастающей, что качественно отличается от ВАХ в стационарном режиме (рис. 6.13). При фиксированной частоте $U_{эф}$, слабо зависит от расхода газа и почти линейно растет с ростом $I_{эф}$. Увеличение частоты колебаний при фиксированном $I_{эф}$ приводит к уменьшению $I_{эф}$. Следовательно, сопротивление дуги переменному току при $I_{эф} = const$ зависит от частоты колебаний и с ростом частоты быстро убывает. Из рис. 6.13 видно, что изменения расхода газа слабо влияют на зависимости $U_{эф}$ от $I_{эф}$ в исследованном диапазоне параметров.

Экспериментальные зависимости активной мощности N , выделяемой в ЭДП, от $I_{эф}$, G , f с учетом (6.5), приведены на рис. 6.14. Как видно, величина N

увеличивается с ростом $I_{эф}$. При $G = const$ изменение f значительно влияет на N в диапазоне $I_{эф} > 10 \text{ A}$. В области $I_{эф} < 10 \text{ A}$ зависимость $N(f)$ выражена слабо. При постоянных значениях $I_{эф}$ и G величина N уменьшается с ростом частоты. Наиболее сильно это наблюдается в области $I_{эф} > 30 \text{ A}$.

3. Тепловые характеристики ЭАП в режиме модуляции тока, дуги

Как видно из 6.4.1, модуляция тока дуги приводит к увеличению джоулевой диссипации энергии электрического поля. При этом возрастают и тепловые потоки в элементы конструкции ЭДП. На рис. 6.15 приведены распределения тепловых потоков в стенку вдоль разрядной камеры плазмотрона. Тепловые потоки через единицу длины РК в стационарном режиме q_0 и модулированном q_i определялись калориметрическим методом. Для большей наглядности на рисунке приведены распределения $\Delta q(z)$, $\Delta q = q_i - q_0$ [54].

С ростом $I_{эф}$ тепловые потоки в стенки РК возрастают. Однако следует подчеркнуть, что прирост Δq за счет $I_{эф}$ меньше, чем аналогичный прирост за счет увеличения на такую же величину I_0 . Наибольшее увеличение Δq наблюдается на начальном участке канала. На переходном участке Δq резко уменьшается, а на предельном участке канала возмущения тока не вызывают изменение q .

Наибольшее влияние модуляции тока на тепловые потоки наблюдается при малых расходах газа. С ростом расхода плаз-мообразующего газа это влияние ослабевает. Это можно объяснить тем, что при малых величинах G меньше проявляется стабилизирующий фактор закрученного потока, а переменный ток ведет к появлению пространственной неустойчивости ПС. На начальном участке канала, дополнительно к излучению дуги, активизируются и другие механизмы переноса тепла к стенкам. С увеличением G газодинамическая стабилизация дуги возрастает, а дестабилизирующие возможности переменной

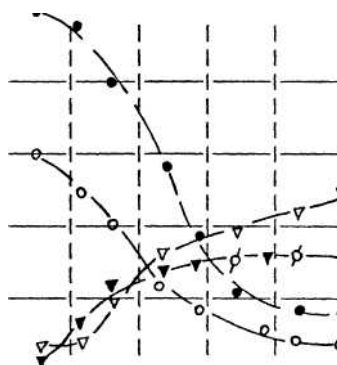


Рис.6.15. Зависимости распределения приращения тепловых потоков в разрядной камере ЭДП от глубины модуляции тока и расхода газа: $I_0 = 50 \text{ А}$; $\circ - I_{\text{эф}} = 15 \text{ А}$; $\bullet - I_{\text{эф}} = 30 \text{ А}$; $f = 4 \text{ кГц}$; $G \geq 0,2; 0,4; 0,6; 1 \text{ г/с}$; $\Delta q = q_1 - q_0$

составляющей тока ослабевают, что ведет к уменьшению Δq . Как видно из рис. 6.15, при расходе газа $G = 1 \text{ г/с}$ величина Δq на начальном участке канала мала, а ближе к предельному участку возрастает. Здесь, видимо, сказывается снижение закрученности потока вдоль оси z . Как и следовало ожидать, с ростом частоты колебаний влияние модуляции на распределение Δq ослабевает.

Таким образом, в исследованном диапазоне параметров увеличение мощности дуги за счет модуляции тока не ведет к существенному росту тепловых потерь. Колебания тока способствуют интенсификации процессов теплообмена между электрической дугой и плазмообразующим газом и, в конечном итоге, приводят к росту среднemasсовой энтальпии потока. Следовательно, с энергетической точки зрения эффективность нагрева газов в ЭДП при модуляции тока дуги не ослабевает, а наоборот повышается по сравнению с нагревом в ЭДП постоянного тока.

4. О влиянии модуляции тока дуги на параметры плазменной струи

Экспериментальные исследования характеристик ЭДП при малых возмущениях показали значительное влияние глубины и частоты модуляции тока дуги на длину, форму и структуру плазменной струи [56]. Как видно из рис. 6.16, в стационарном режиме струя плазмы имеет строгую (кинжальную) форму, устойчивую во времени, чем больше сила тока, тем плазменная струя длиннее. При наложении тока модуляции появляются пространственные колебания струи, светящееся ядро струи расширяется, а ее длина уменьшается.

С целью более глубокого понимания процессов, были проведены специальные эксперименты [72, 73]. На рис. 6.17 приведены зависимости средней длины струи плазмы l от силы тока в стационарном режиме. Как видно, для данного ЭДП, при $G = \text{const}$, длина струи увеличивается линейно с ростом силы тока.

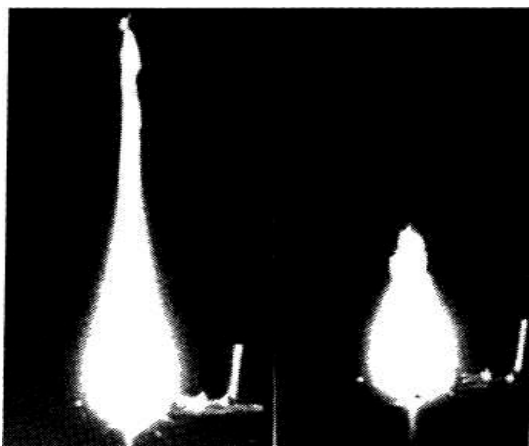


Рис. 6.16. Фотографии плазменной струи, истекающей из ЭДП: $G = 0,4$ г/с; а — стационарный режим при $I_0 = 150$ А; в — при модуляции тока дуги, $I_{\phi} = 10$ А, $f = 1$ кГц [56]

Это обусловлено увеличением мощности, выделяемой на единицу массы газа, а потому и среднemasсовой температуры плазмы. С ростом расхода газа, при $I_0 = const$, l уменьшается, что связано с снижением величины среднemasсовой температуры. В режиме модуляции тока на длину струи влияет как величина I_{ϕ} , так и частота колебаний f . Результаты опытов показали, что с ростом f величина l убывает до минимального значения при $f = 1$ кГц, а затем постепенно растет. При $f = 4$ кГц длина струи восстанавливается до значения в стационарном режиме и от величины I_{ϕ} не зависит (рис. 6.18). Влияние модуляции тока дуги в диапазоне частот от 4 кГц до 20 кГц на длину струи не установлено. С ростом глубины модуляции тока эффект уменьшения l с ростом f усиливается. Наблюдаемая нелинейная зависимость длины струи от параметров модуляции является дополнительным свидетельством сложного характера взаимодействия электрических, тепловых и газодинамических процессов, протекающих в объеме разрядной камеры электродуговых плазмотронов. Наиболее сильное влияние режимов модуляции тока на параметры струи плазмы наблюдается при малых расходах газа, с ростом величины G указанное влияние ослабевает, а при $G > 0,8$ г/с практически исчезает.

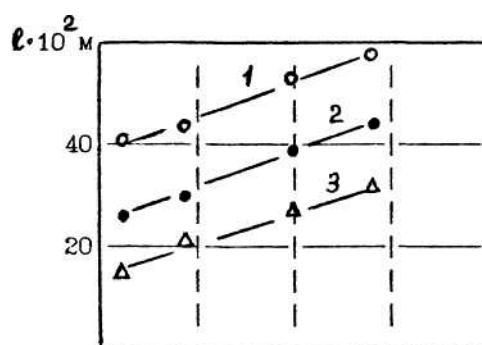


Рис. 6.17. Зависимости средней длины плазменной струи ЭДП от силы тока дуги и расхода газа: $G = 0,2$ г/с (1), $0,4$ г/с (2), $0,8$ г/с (3)

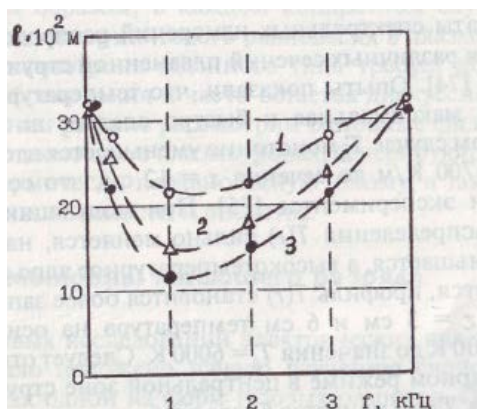


Рис. 6.18. Зависимости средней длины плазменной струи ЭДП от частоты и глубины модуляции тока дуги: $G = 0,4$ г/с; $I_0 = 75$ А; $I_{\text{эф}} = 10$ А (1), 20 А (2), 30 А (3)

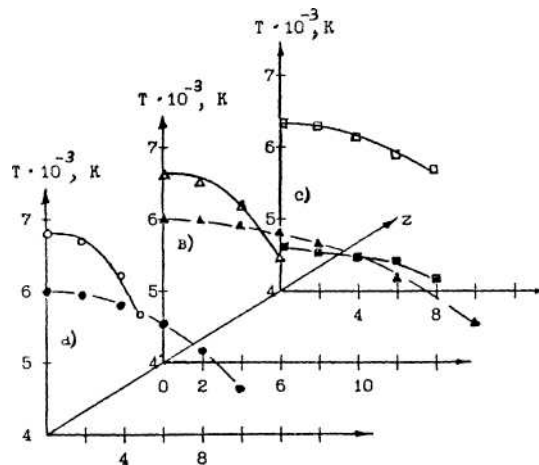


Рис. 6.19. Распределения температуры в плазменной струе по длине и по радиусу: $G = 0,2$ гс; $I_0 = 75$ А; $I_{эф} = 30$ А; $f = 1$ кГц; а) $z = 3$ см; в) $z = 6$ см; с) $z = 9$ см; $z = 0$ — соответствует поверхности анода; сплошные линии соответствуют стационарному режиму горения дуги, штриховые — режиму при модуляции тока.

Результаты спектральных измерений распределения температуры для различных сечений плазменной струи приведены на рис. 6.19 [74]. Опыты показали, что температура на оси T_o (при $r = 0$) максимальная и быстро спадает по радиусу. В стационарном случае Γ монотонно уменьшается вдоль струи со скоростью 5700 К/м до сечения $z = 12$ см, что согласуется с результатами экспериментов [75]. При модуляции тока дуги структура распределения $T(r)$ сильно меняется, на оси T несколько уменьшается, а высокотемпературное ядро струи сильно расширяется, профиль $T(r)$ становится более заполненным. В сечениях $z = 3$ см и 6 см температура на оси падает от величины 6800 К до значения $T_o = 6000$ К. Следует отметить, что в нестационарном режиме в центральной зоне струи (до $r = 4$ мм) величина T от r меняется более слабо, чем в стационарном случае. Аналогичное изменение распределения $T(r)$ при модуляции тока наблюдается и в области ПС дуги в разрядной камере ЭДП.