

## СВАРКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.791

*А. В. Савинов*

### СТОЙКОСТЬ НЕПЛАВЯЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ АРГОДУГОВОЙ СВАРКЕ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Волгоградский государственный технический университет  
e-mail:weld@vstu.ru

Показано влияние материала неплавящегося электрода на особенности оплавления его рабочего участка на переменном токе. Приведены эмпирические зависимости стойкости электродов от длительности импульсов тока прямой и обратной полярности.

*Ключевые слова:* стойкость неплавящегося электрода, переменный ток, аргодуговая сварка.

Influence of a material of non-consumable electrode on features of the melting of its working area at alternating current is shown. Empirical dependences of durability the electrodes on duration of the current pulses of straight and reverse polarity are given.

*Keywords:* durability of electrode, alternating current, argon-arc welding.

При сварке дугой переменного тока вольфрамовый электрод работает в более напряженном тепловом режиме (в сравнении с дугой постоянного тока прямой полярности). Независимо от исходной формы рабочего участка его торец всегда оплавлен, хотя и в разной степени, определяемой конструкцией электрода.

Если электрод выполнен из вольфрама с активирующими присадками, тепловой поток от дуги на рабочий участок оказывается меньшим (в сравнении с электродом из чистого вольфрама) в полупериоды прямой полярности. В результате средняя температура рабочего участка такого электрода меньше, а максимальный допустимый ток больше. На торце электрода из вольфрама с активирующими присадками обычно формируется несколько обособленных мелких капель (рис. 1, б). Капли расплава служат своеобразными локальными катодами, т. е. на их поверхности размещаются катодные пятна в полупериоды прямой полярности. По всей вероятности, на них же сосредоточиваются дискретные анодные пятна в полупериоды обратной полярности. Это обстоятельство обуславливает высокую плотность тока, протекающего через эти капли. Если она оказывается чрезмерной, капли срываются с торца электрода и попадают в сварочную ванну. В результате

в металле шва оказываются случайным образом распределенные вольфрамовые включения (рис. 2). При увеличении тока может быть достигнуто такое состояние рабочего участка, когда отдельные мелкие капли сливаются в одну большую, однако не ясно, является ли это следствием увеличения теплового потока в неплавящийся электрод или результатом «выгорания» активирующих присадок.

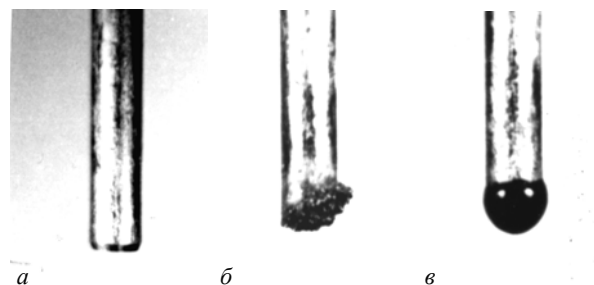


Рис. 1. Вид неплавящихся электродов:  
а – исходное состояние; б – электроды ЭВЛ; в – электроды ЭВЧ  
диаметром 4 мм после сварки; ток переменный,  $I_d = 220$  А



Рис. 2. Радиографический снимок проплавления пластины из сплава АМг6: электрод ЭВЛ диаметром 4 мм;  $I_d = 220$  А

Торец электрода из чистого вольфрама оплавляется полностью, и при достаточно большом токе дуги на конце электрода формируется капля расплавленного металла, размеры которой зависят от тока дуги и диаметра электрода (рис. 1, в). Оплавление торца считается необходимым условием пространственной устойчивости дуги переменного тока и возможности применения ее для сварки. Собственно говоря, именно это обстоятельство и определяет минимально допустимое значение переменного тока для электрода определенного диаметра. При увеличении тока дуги капля расплава растет и ее диаметр может вдвое превышать диаметр электрода (у электродов сравнительно малых диаметров). При чрезмерной величине капля начинает колебаться, что затрудняет сварку и может привести к ее падению в сварочную ванну. Если в этот момент уменьшить ток дуги, положение капли на конце электрода снова стабилизируется. Соответствующее этому состоянию значение тока принималось максимально допустимым для данного электрода.

В связи с этим нельзя дать однозначный ответ на вопрос о том, какие электроды, из чистого вольфрама или вольфрама с активирующими присадками, следует предпочесть при сварке дугой переменного тока. По этой же причине имеющиеся в литературе рекомендации к выбору неплавящихся электродов носят противоречивый характер. Так, например, в некоторых работах [1 ... 3] предлагается для сварки дугой переменного тока алюминия и его сплавов применять электроды из вольфрама с активирующими присадками. В ряде других источников [4, 5] для этих же целей рекомендуется применять электроды из чистого вольфрама.

По-видимому, в тех случаях, когда техническими условиями не допускаются вольфрамовые включения в металле шва, сварку дугой переменного тока следует выполнять электродами из чистого вольфрама. При правильно выбранном режиме сварки (имеется ввиду величина тока дуги) это позволяет полностью исключить вольфрамовые включения в шве. Если техническими условиями отсутствие вольфрамовых включений не оговаривается, экономически целесообразно выполнять сварку электродами из вольфрама с активирующими присадками, так как это дает возможность увеличить плотность тока на электроде и в результате повысить производительность процесса.

На рис. 3 представлены зависимости критической величины тока дуги  $I_{кр}$  (при которой начинается разрушение электрода) от длительности импульсов тока обратной полярности (при частоте  $f = 50$  Гц) для электродов различных диаметров и материалов при сварке на переменном токе с импульсами прямоугольной формы. При меньшей длительности импульсов обратной полярности по отношению к прямой наибольшую стойкость имеют электроды из вольфрама с оксидами иттрия, наименьшую – из технически чистого вольфрама. Если же  $\tau_{обр} \geq \tau_{пр}$ , материал электродов практически не оказывает влияния на их работоспособность.

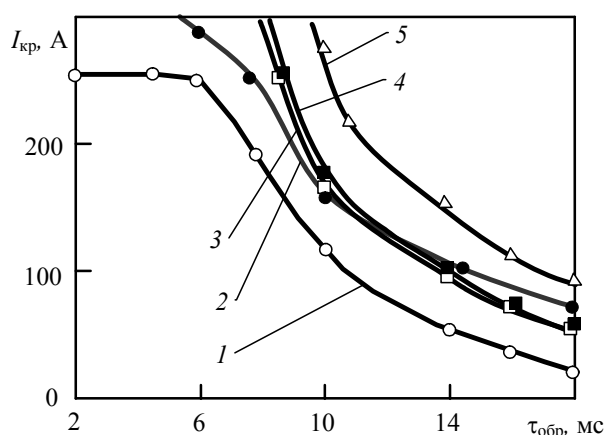


Рис. 3. Критическая величина тока  $I_{кр}$  в зависимости от длительности импульсов обратной полярности  $\tau_{обр}$ :  $f = 50$  Гц; 1 – ЭВЛ Ø 2 мм; 2 – ЭВЧ Ø 3 мм; 3 – ЭВЛ Ø 3 мм; 4 – ЭВИ Ø 3 мм; 5 – ЭВЛ Ø 4 мм

При уменьшении  $\tau_{обр}$  величина критического тока растет и при  $\tau_{обр} \leq 2,5$  мс близка к этой характеристике при сварке дугой постоянного тока прямой полярности. Объяснить этот факт можно тем, что за время сравнительно длительного импульса тока прямой полярности электрод успевает «отдать» избыточную энергию, накопленную за время импульса обратной полярности.

Поскольку при сварке алюминия и его сплавов на переменном токе катодная очистка окисной пленки на свариваемой поверхности происходит только во время горения дуги на обратной полярности, практический интерес представляет диапазон возможного уменьшения длительности импульсов тока прямой полярности без ущерба для стойкости электрода.

Для выяснения пределов допустимого снижения  $\tau_{пр}$  определяли  $I_{кр}$  для неплавящихся электродов в зависимости от длительности импульсов тока прямой полярности (длительность

$\tau_{обр}$  составляла 2,5 мс). Как видно из рис. 4, для электрода ЭВЛ диаметром 2 мм при уменьшении  $\tau_{пр}$  с 17,5 до 7,5 мс величина  $I_{кр}$  сохраняется высокой (при этом разрушение электрода происходит примерно на середине вылета (рис. 5)). При дальнейшем уменьшении  $\tau_{пр}$  стойкость электрода резко снижается, причем изменяется и характер его разрушения: происходит оплавление его рабочего участка. Для более глубокого изучения влияния различных соотношений длительностей импульсов тока прямой и обратной полярности на критическую величину тока для электродов различного материала и диаметра проведены эксперименты, в результате которых (рис. 6) установлено, что зависимость  $I_{кр} = f(\tau_{пр})$  для электродов ЭВЛ  $\varnothing$  2 мм и ЭВЧ  $\varnothing$  3 мм имеет перегиб, где производная функции меняет свой знак, а сама функция приобретает форму кривой выпуклостью вверх. Можно предположить, что при больших значениях тока этот факт будет иметь место и для электродов ЭВЛ  $\varnothing$  3, 4 и 5 мм.

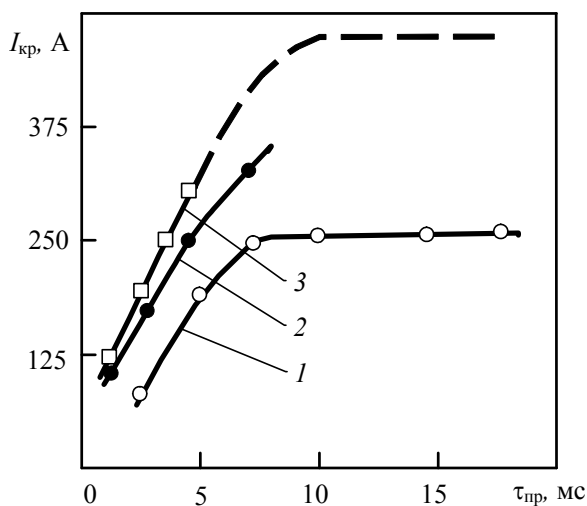


Рис. 4. Критическая величина тока  $I_{кр}$  в зависимости от  $\tau_{пр}$  ( $\tau_{обр} = 2,5$  мс):  
1 – ЭВЛ  $\varnothing$  2 мм; 2 – ЭВЧ  $\varnothing$  3 мм; 3 – ЭВЛ, ЭВИ  $\varnothing$  3 мм

В результате обработки результатов опытов (рис. 6) выявлены эмпирические зависимости влияния длительностей импульсов тока прямой и обратной полярности на критическую величину тока.

Для электрода ЭВЛ диаметром 4 мм (рис. 6, з):

$$I_{кр} = 10^{(10^{(-0,85 \lg \tau_{обр} - 0,35)} \tau_{пр} + 1,83)}. \quad (1)$$

Из формулы (1) получаем выражение для определения минимальной (критической) длительности импульсов тока прямой полярности,

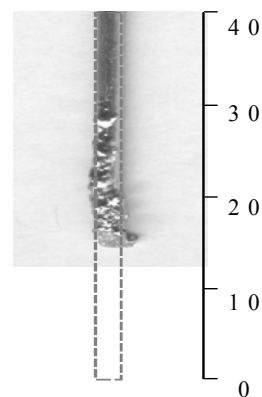


Рис. 5. Вид уцелевшего участка электрода ЭВЛ  $\varnothing$  2 мм после разрушения на вылете:  $\tau_{обр} = 2,5$  мс;  $\tau_{пр} = 10$  мс;  $I_d = 250$  А

при которой начинает происходить разрушение рабочего участка электрода при заданных значениях величины тока  $I_d$  и длительности импульсов тока обратной полярности  $\tau_{обр}$ :

$$\tau_{пр} = \frac{(\lg I_d - 1,83)}{10^{(-0,85 \lg \tau_{обр} - 0,35)}}. \quad (2)$$

Соответственно, максимальная (критическая) длительность  $\tau_{обр}$  при заданных значениях  $I_d$  и  $\tau_{пр}$  с учетом (2) определяется:

$$\tau_{обр} = 10^{\frac{(-0,35 - \lg(\frac{\lg I_d - 1,83}{\tau_{пр}}))}{0,85}}. \quad (3)$$

Для электродов ЭВЛ, ЭВИ  $\varnothing$  2 мм и ЭВЧ  $\varnothing$  3 мм в расчетах учитывалось, что зависимости  $I_{кр} = f(\tau_{пр})$  при различных  $\tau_{обр}$  имеют точку перегиба. Для электродов ЭВЛ, ЭВИ  $\varnothing$  2 мм:

$$I_{кр,расч} = 10^{(10^{(-1,025 \lg \tau_{обр} - 0,32)} \tau_{пр} + 1,49)}; \quad (4)$$

$$\tau_{пр} = \frac{(\lg I_{кр} - 1,49)}{10^{(-1,025 \lg \tau_{обр} - 0,32)}}; \quad (5)$$

$$\tau_{обр} = 10^{\frac{(-0,32 - \lg(\frac{\lg I_{кр} - 1,49}{\tau_{пр}}))}{1,025}}. \quad (6)$$

Для электрода ЭВЛ, ЭВИ  $\varnothing$  3 мм:

$$I_{кр} = 10^{(10^{(-1,067 \lg \tau_{обр} - 0,25)} \tau_{пр} + 1,73)}; \quad (7)$$

$$\tau_{пр} = \frac{(\lg I - 1,73)}{10^{(-1,067 \lg \tau_{обр} - 0,25)}}; \quad (8)$$

$$\tau_{обр} = 10^{\frac{(-0,25 - \lg(\frac{\lg I - 1,73}{\tau_{пр}}))}{1,067}}. \quad (9)$$

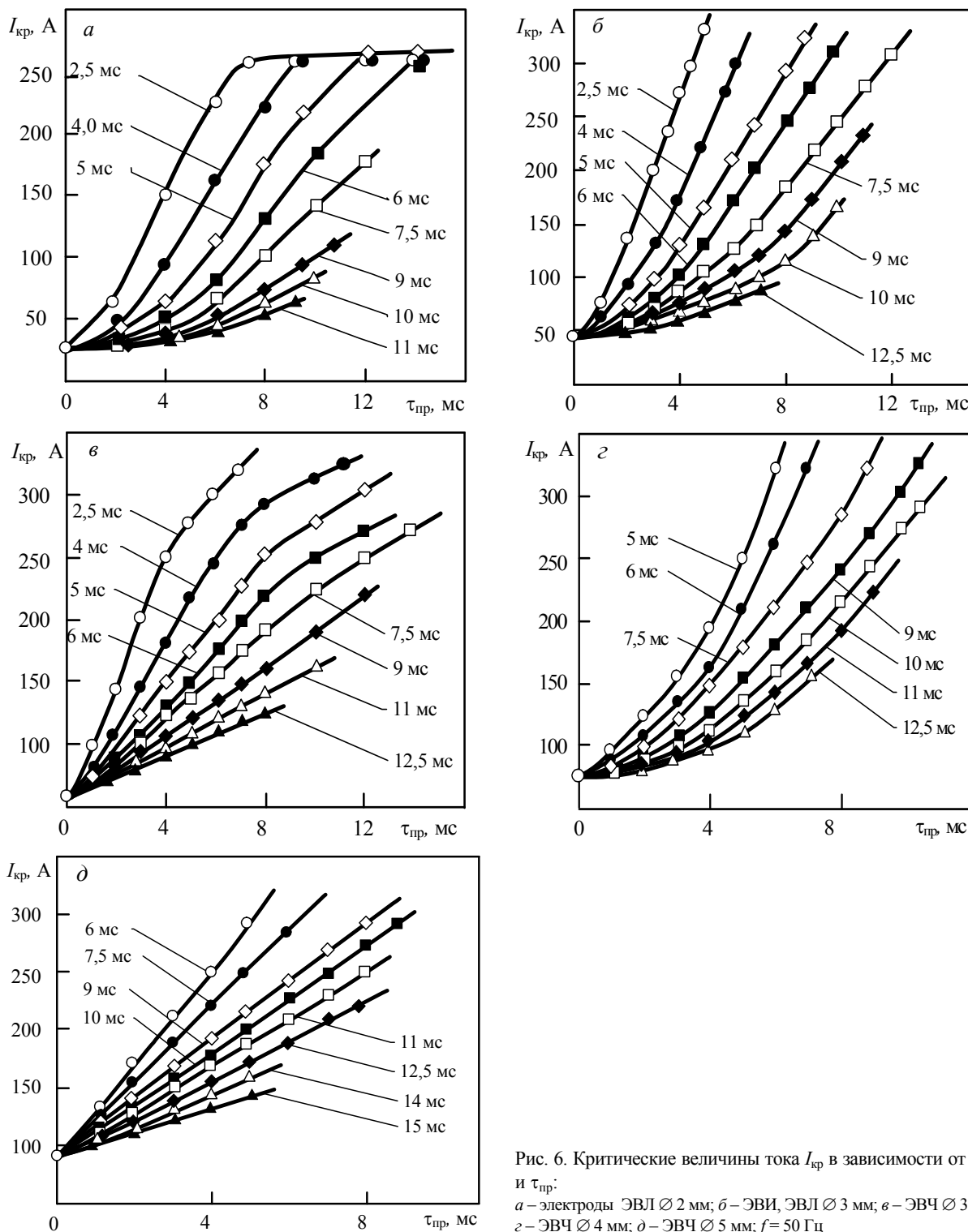


Рис. 6. Критические величины тока  $I_{кр}$  в зависимости от  $\tau_{обр}$  и  $\tau_{кр}$ :  
 а – электроды ЭВЛ  $\varnothing$  2 мм; б – ЭВИ, ЭВЛ  $\varnothing$  3 мм; в – ЭВЧ  $\varnothing$  3 мм;  
 г – ЭВЧ  $\varnothing$  4 мм; д – ЭВЧ  $\varnothing$  5 мм;  $f = 50$  Гц

Для электрода ЭВЧ  $\varnothing$  3 мм:

– при  $\tau_{обр} > 5$  мс

$$I_{кр} = 10^{(1,55 - 0,05\tau_{обр})} \tau_{кр} + 60; \quad (10)$$

– при  $\tau_{обр} \leq 5$  мс

$$I_{кр} = 10^{(1,968 - 0,123\tau_{обр})} \tau_{кр} + 60; \quad (11)$$

– при  $\tau_{обр} > 5$  мс

$$\tau_{кр} = \frac{(I_{кр} - 60)}{10^{(1,55 - 0,05\tau_{обр})}}; \quad (12)$$

– при  $\tau_{обр} \leq 5$  мс

$$\tau_{кр} = \frac{(I_{кр} - 60)}{10^{(1,968 - 0,123\tau_{обр})}}; \quad (13)$$

$$\tau_{обр} = \frac{1,55 - \lg\left(\frac{I_{кр} - 60}{\tau_{пр}}\right)}{0,05}$$

при  $\lg [(I_{кр} - 60) / \tau_{пр}] < 1,346$ ;

$$\tau_{обр} = \frac{1,968 - \lg\left(\frac{I_{кр} - 60}{\tau_{пр}}\right)}{0,123}$$

при  $\lg [(I_{кр} - 60) / \tau_{пр}] \geq 1,346$ . (14)

Для электродов ЭВЛ, ЭВИ Ø 5 мм:

если  $0 < \tau_{обр} \leq 4$  мс:

$$I_{кр} = 10^{(2,28 - 0,128\tau_{обр})} \tau_{пр} + 90; \quad (15)$$

$$\tau_{пр} = \frac{(I_{кр} - 90)}{10^{(2,28 - 0,128\tau_{обр})}}; \quad (16)$$

если  $4 < \tau_{обр} \leq 9,5$  мс:

$$I_{кр} = 10^{(2,03 - 0,069\tau_{обр})} \tau_{пр} + 90; \quad (17)$$

$$\tau_{пр} = \frac{(I_{кр} - 90)}{10^{(2,03 - 0,069\tau_{обр})}}; \quad (18)$$

если  $\tau_{обр} > 9,5$  мс:

$$I_{кр} = 10^{(1,76 - 0,04\tau_{обр})} \tau_{пр} + 90; \quad (19)$$

$$\tau_{пр} = \frac{(I_{кр} - 90)}{10^{(1,76 - 0,04\tau_{обр})}}; \quad (20)$$

$$\tau_{обр} = \frac{2,28 - \lg\left(\frac{I_{кр} - 90}{\tau_{пр}}\right)}{0,128}$$

при  $\lg [(I_{кр} - 90) / \tau_{пр}] \geq 1,77$ ; (21)

$$\tau_{обр} = \frac{2,03 - \lg\left(\frac{I_{кр} - 90}{\tau_{пр}}\right)}{0,069}$$

при  $1,375 \leq \lg [(I_{кр} - 90) / \tau_{пр}] < 1,77$ ; (22)

$$\tau_{обр} = \frac{1,76 - \lg\left(\frac{I_{кр} - 90}{\tau_{пр}}\right)}{0,04}$$

при  $\lg [(I_{кр} - 90) / \tau_{пр}] < 1,375$ . (23)

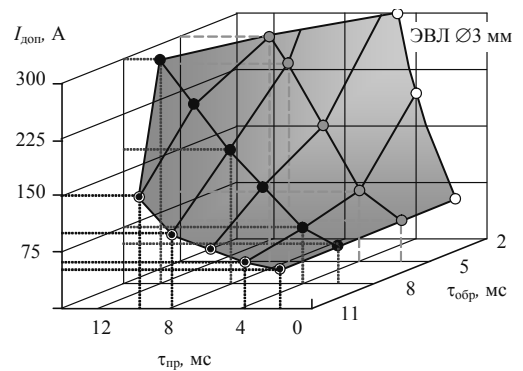
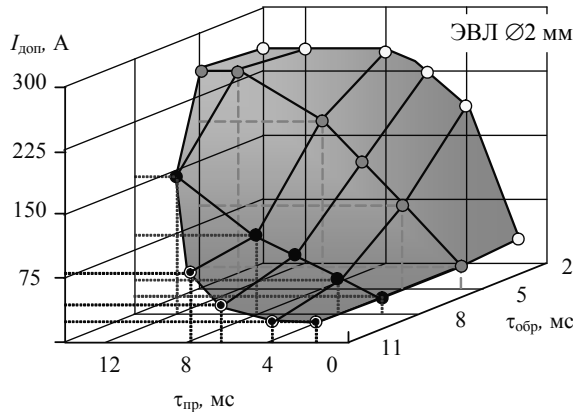
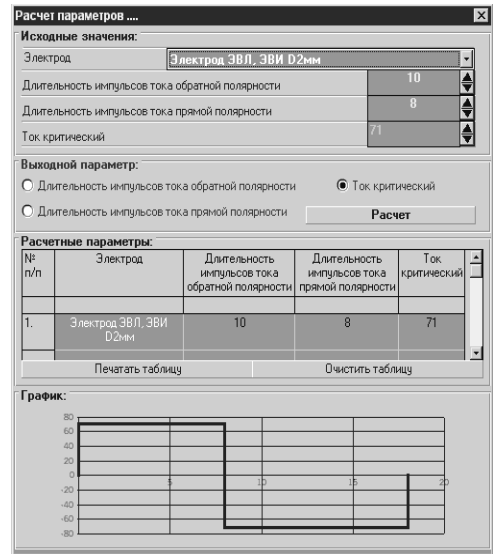
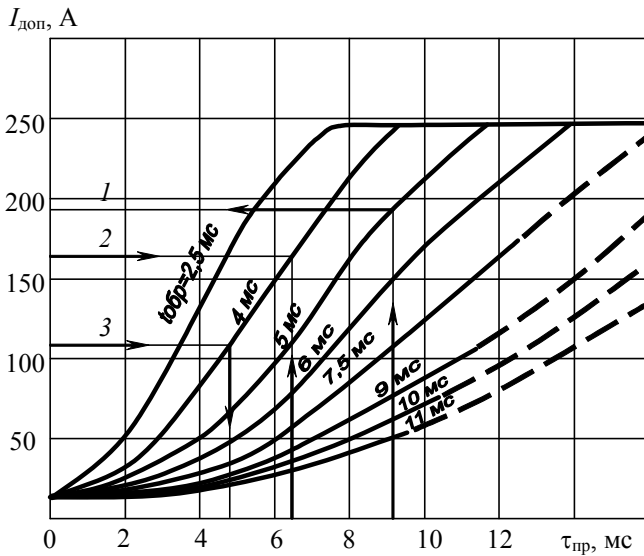


Рис. 7. Пример номограммы для определения областей допустимых режимов и основной функциональный экран программы по выбору параметров дуги

Как показывают результаты экспериментов, при величине тока на 10 ... 20 А ниже его критического значения электрод работает длительное время без разрушения. На основании приведенных выше эмпирических зависимостей разработаны программа, номограммы и области допустимых режимов в координатах  $I_{\text{доп}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{обр}}$ , позволяющие выбрать параметры горения дуги, обеспечивающие высокую работоспособность неплавящихся электродов (рис. 7):

– при заданной длительности импульсов тока прямой и обратной полярности – максимально допустимую величину сварочного тока;

– при заданной величине сварочного тока и требуемой (с точки зрения обеспечения качественной катодной очистки) длительности импульсов тока обратной полярности – минимально допустимую длительность импульсов тока прямой полярности;

– при заданной величине сварочного тока и требуемой (например, для обеспечения нужного проплавления) длительности импульсов тока прямой полярности – максимально допустимую длительность импульсов тока обратной полярности.

### Выводы

1. При определенных соотношениях длительностей импульсов тока прямой и обратной

полярности тепловое состояние и стойкость неплавящихся электродов приближаются к таковым в условиях сварки дугой постоянного тока прямой полярности. Это позволяет повысить эффективность применения неплавящихся электродов для сварки дугой переменного тока.

2. Созданная на основе эмпирических зависимостей критической величины тока от соотношения длительностей импульсов тока прямой и обратной полярности программа позволяет выбрать необходимые параметры режима горения дуги с точки зрения рационального применения неплавящихся электродов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Технология и оборудование сварки плавлением / под ред. Г. Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
3. *Mikami, H.* Rapports sur le comportement des electrodes de tungstene en soudage. TIG / H. Mikami, M. Suzuki, R. Ishii // Soudage et techn. Connexes. – 1966. – № 7 – 8. – P. 333–336.
4. *Goodman, I. S.* New gas tungsten – arc welding electrodes / I. S. Goodman, H. J. Ehringer, R. L. Hackman // Welding Journal. – 1963. – № 7. – P. 567–569.
5. Справочник по сварке / под ред. Е. В. Соколова. – Т. 2. – М.: Машгиз, 1961. – 664 с.