



## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА И ПРОПЛАВЛЕНИЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

**Ю. Н. ЛАНКИН, И. А. РЯБЦЕВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, Я. П. ЧЕРНЯК, В. А. ЖДАНОВ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние электрических параметров дуговой наплавки самозащитными порошковыми проволоками на стабильность процесса и проплавление основного металла. Эксперименты проводили с компьютерной записью электрических параметров наплавки. По результатам обработки осциллограмм построены диаграммы распределения  $I_{св}$  и  $U_{св}$ , на которых выделены области стабильного протекания процесса наплавки, коротких замыканий и обрывов дуги. Из полученных фактических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой выведен коэффициент нестабильности процесса  $\gamma$ . Установлено, что наибольшее влияние на показатели стабильности оказывает напряжение, с повышением которого стабильность процесса возрастает. Исследовано влияние режимов наплавки на проплавление и долю основного металла в наплавленном металле. По результатам оценки построена трехмерная диаграмма, на которой выделена область оптимальных режимов, обеспечивающих достаточную стабильность процесса при минимальном проплавлении и хорошем формировании наплавленных валиков. Библиогр. 4, табл. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, порошковая проволока, стабильность процесса наплавки, коэффициент нестабильности, проплавление основного металла, доля основного металла

При дуговой многослойной наплавке необходимый состав наплавленного металла вследствие перемешивания его с основным металлом удается получить только в третьем или четвертом слое [1]. Если необходима механическая обработка детали после наплавки, то приходится наплавлять как минимум пять слоев. Проблема осложняется еще и тем, что с увеличением толщины наплавленного слоя в нем растут остаточные скалывающие напряжения и одновременно увеличивается вероятность появления в наплавленном слое разного рода дефектов, которые снижают его эксплуатационные свойства, в том числе, усталостную долговечность при циклических нагрузках [2, 3]. Таким образом, одной из важнейших характеристик для наплавки является доля основного металла (ДОМ) в наплавленном, при прочих равных условиях пропорциональная проплавлению основного металла. Уменьшение проплавления основного металла не только сокращает расход дорогостоящих наплавочных материалов, но и улучшает качество и эксплуатационные свойства наплавленных деталей.

Цель настоящей работы — исследование влияния электрических параметров дуговой наплавки порошковыми проволоками, в частности, стабильности этих показателей на характеристики проплавления основного металла.

**Материалы и оборудование.** Для исследований использовали самозащитную порошко-

вую проволоку ПП-АН130, обеспечивающую получение наплавленного металла типа инструментальной стали 25Х5ФМС. Предварительно была выбрана газошлакообразующая система порошковой проволоки, которая обеспечивала бы наилучшие сварочно-технологические свойства. Для этой цели изготовили четыре самозащитные порошковые проволоки ПП-АН130 диаметром 2 мм с различными системами газошлакообразующих компонентов:  $CaO+TiO_2+MgO+CaF_2+Al_2O_3$  (проволока с условным обозначением ПП-АН130-1);  $CaO+MgO+CaF_2+Al_2O_3$  (ПП-АН130-2);  $CaO+CaF_2+Al_2O_3$  (ПП-АН130-3);  $CaO+CaF_2+Al_2O_3$ +крахмал (ПП-АН130-4).

Произведена экспертная оценка (5 экспертов) сварочно-технологических свойств проволок всех четырех типов (характер переноса металла, покрытие шлаком наплавленных валиков, наличие пор). Для этого использовали следующую систему экспертных оценок. Перенос обозначили следующими цифрами: 1 — мелкокапельный; 2 — крупнокапельный; 3 — смешанный; степень покрытия шлаком оценивали в процентах; пористость — по двухбалльной системе: наличие (есть) или отсутствие (нет) пор. Предпочтение отдавали мелкокапельному переносу, 100-процентному покрытию шлаком наплавленных валиков и отсутствию пор в наплавленном металле.

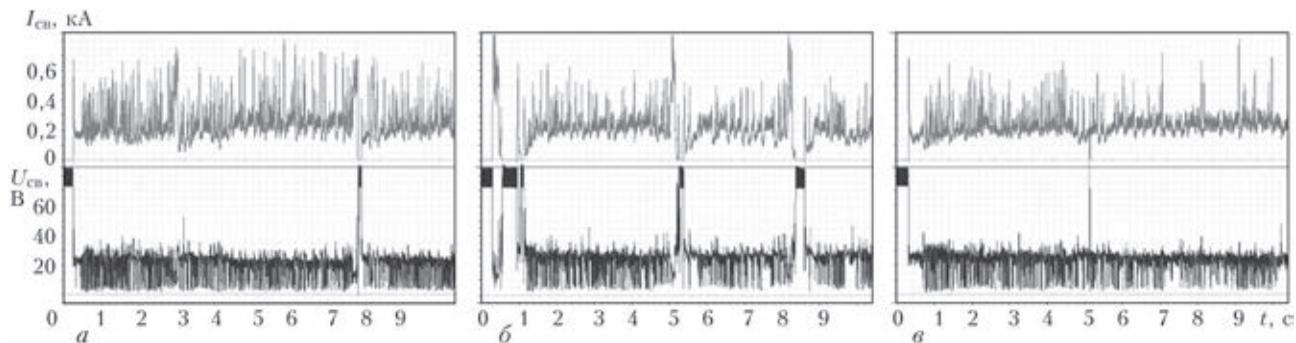


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения при наплавке самозащитной порошковой проволокой ПП-АН130-1 на различных режимах: а-в — соответственно эксперимент № 2, 5, 8 по табл. 2

Наплавку образцов производили на токе 230...250 А и скорости 20 м/ч. Так как решающее влияние на образование пор при наплавке самозащитными порошковыми проволоками оказывает напряжение [4], то его изменяли от 24 В и выше до появления пор в наплавленном металле для каждого типа порошковой проволоки (табл. 1).

Согласно экспертной оценке из четырех порошковых проволок наилучшие сварочно-технологические свойства отмечены у порошковой проволоки ПП-АН130-1, которая и выбрана для дальнейших исследований.

Для экспериментов по наплавке использовали наплавочный автомат АД-231 с выпрямителем ВДУ 506. Наплавку производили на листы из стали Ст.3 толщиной 15 мм. Ток и напряжения наплавки регистрировали с помощью компьютерной информационно-измерительной системы. В качестве первичного измерительного преобразователя сварочного тока использовали измерительный шунт 75ШС-450-05, а напряжения сварки — резисторный делитель 10:1. Оцифровку и ввод данных первичных преобразователей в компьютер осуществляли с помощью измерительного преобразователя напряжения Е14-440 фирмы «Л-Кард» со встроенным 14-разрядным

Таблица 1. Результаты оценки сварочно-технологических свойств порошковых проволок типа ПП-АН130

Условное обозначение порошковой проволоки	Напряжение, В	Покрывание шлаком, %	Наличие пор	Характер переноса, баллы
ПП-АН130-1	24	100	Нет	3
	28	100	-»-	3
	32	100	Есть	2
ПП-АН130-2	24	100	Нет	3
	28	80	Есть	3
	32	60	-»-	2
ПП-АН130-3	24	100	Нет	3
	28	100	-»-	3
	32	80	Есть	2
ПП-АН130-4	24	90	Нет	1
	28	90	-»-	3
	32	90	-»-	3
	34	90	-»-	3
	36	90	Есть	3

16-канальным АЦП с частотой преобразования до 440 кГц. В наших опытах регистрацию параметров осуществляли с частотой 20 кГц, что вполне доста-

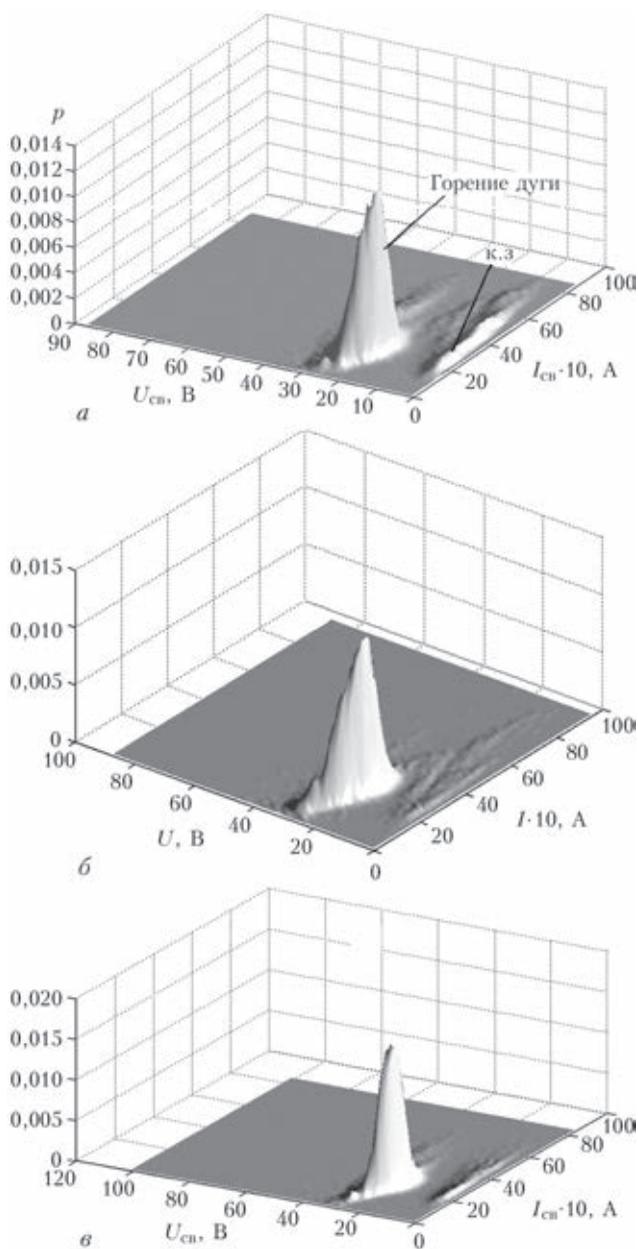


Рис. 2. Распределение совместной плотности вероятности тока наплавки и напряжения дуги, рассчитанные для осциллограмм, представленных на рис. 1



Таблица 2. Параметры процесса дуговой наплавки самозащитной порошковой проволокой ПП-АН130-1

Параметр	Номер эксперимента								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{св}$ , В	22,4	21,8	20,8	23,7	24,8	23,5	25,3	24,4	26
$V(U_{св})$	0,5	0,32	0,68	0,22	0,31	0,19	0,17	0,18	0,11
$I_{св}$ , А	188	256,7	293,7	181,9	243,5	288,1	193,5	241,2	277,9
$V(I_{св})$	0,54	0,45	0,69	0,39	0,35	0,31	0,29	0,27	0,22
$I_{д}$ , А	174,5	239,4	235,3	175,4	241,1	280,7	190,4	237,8	277,2
$V(I_{д})$	0,41	0,37	0,48	0,32	0,3	0,26	0,25	0,25	0,22
$U_{д}$ , В	23,6	23,3	23,7	24,6	24,9	24,1	25,7	24,8	26,1
$V(U_{д})$	0,17	0,15	0,21	0,12	0,15	0,12	0,11	0,13	0,10
$I_{к.з}$ , А	369,5	433,5	528,8	325	493,4	485,3	328,5	385,6	435,4
$V(I_{к.з})$	0,39	0,33	0,27	0,37	0,34	0,28	0,36	0,32	0,29
$U_{к.з}$ , В	6,6	6,2	9,2	4,6	7,9	6,7	5,5	6,1	7,3
$V(U_{к.з})$	0,61	0,44	0,40	0,41	0,49	0,37	0,69	0,38	0,33
$t_{д}$ , %	90,76	90,81	77,23	95,62	97,59	96,40	97,70	97,65	99,57
$t_{к.з}$ , %	6,6	8,94	19,57	4,38	1	3,6	2,3	2,28	0,43
$t_{об}$ , %	2,6	0,25	3,2	0	1,41	0	0	0,07	0
$F_{к.з}$ , Гц	13,29	19,25	13,75	14,58	2,49	8,21	9,91	8,38	1,99
$T_{зак}$ , с	0	0	0,45	0	0,83	0	0	0	0
$T_{св}$ , с	42,33	41,12	43,85	39,98	41,41	41,51	40,13	39,99	42,03
$N_{об}$	10	3	21	0	6	0	0	1	0
$N_{к.з.зак}$	1	1	5	1	7	1	1	1	1
$\gamma$ , отн. ед.	1,03	0,607	1,78	0,47	0,59	0,41	0,38	0,39	0,32
$g_0$ , %	34,75	24,1	20,6	39,1	30,2	33	42,35	29,1	33,1

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения:  $U_{св}$ ,  $I_{св}$  — средние значения напряжения и тока соответственно за время наплавки;  $V(U_{св})$ ,  $V(I_{св})$  — коэффициенты вариации напряжения и тока за время наплавки, где коэффициент вариации – отношение среднеквадратичного значения параметра к его среднему значению;  $I_{д}$ ,  $U_{д}$ ,  $V(I_{д})$ ,  $V(U_{д})$  — средние за время горения дуги (без периодов начального возбуждения дуги) значения тока, напряжения, коэффициента вариации тока и напряжения соответственно;  $I_{к.з}$ ,  $U_{к.з}$ ,  $V(I_{к.з})$ ,  $V(U_{к.з})$  — средние за время короткого замыкания дугового промежутка (без периодов начального возбуждения дуги) значения тока, напряжения, коэффициента вариации тока и напряжения соответственно;  $t_{д}$  — удельная длительность горения дуги, равная суммарной длительности периодов горения дуги и общего времени сварки без периода зажигания дуги;  $t_{к.з}$  — удельная длительность коротких замыканий, равная суммарной длительности периодов коротких замыканий и общего времени сварки, без периода зажигания дуги;  $t_{об}$  — удельная длительность обрывов дуги, равная отношению суммарной длительности периодов обрывов дуги к общей продолжительности времени наплавки;  $F_{к.з}$  — частота коротких замыканий дугового промежутка без периода зажигания дуги;  $T_{зак}$ ,  $T_{св}$  — длительность времени начального возбуждения дуги и общая продолжительность времени наплавки;  $N_{к.з.зак}$  — количество коротких замыканий за период начального возбуждения дуги;  $N_{об}$  — количество обрывов за время  $T_{св}$ ;  $\gamma$  — коэффициент нестабильности процесса.

точно для точных исследований быстропротекающих процессов в дуге, например, коротких замыканий дугового промежутка. Осциллограммы тока и напряжения при наплавке на различных режимах самозащитной порошковой проволоки ПП-АН130-1 приведены на рис. 1 и табл. 2.

Обработку данных производили с помощью специально разработанного программного обеспечения в средах Visual Studio.NET, PowerGraph3.3 и MATLAB 7. По введенным в компьютер данным автоматически идентифицируется текущее состояние исследуемого процесса (зажигание дуги, обрывы дуги, короткие замыкания дугового промежутка, периоды горения дуги) и рассчитываются параметры тока и напряжения для соответствующего состояния процесса наплавки.

**Результаты.** Для определения влияния тока и напряжения наплавки на нестабильность процесса и ДОМ в наплавленном металле был проведен полный факторный эксперимент. Ток и напряжение (факторы) варьировали на трех уровнях, что дает возможность построить модели второго порядка, более адекватно описывающие исследуемый процесс. Токи устанавливали на уровнях порядка 200, 250, 300 А, а напряжения — 22, 24, 26 В. Скорость наплавки во всех случаях оставалась постоянной — 20 м/ч. Измеренные и рассчитанные параметры процесса наплавки сведены в табл. 2.

Трехмерные диаграммы распределения совместной плотности вероятности  $U_{св}$  и  $I_{св}$  только для собственно процесса наплавки без периода начального зажигания дуги приведены на рис. 2. По вертикаль-

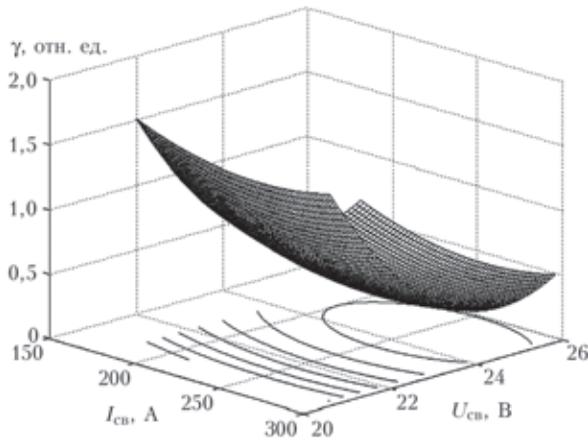


Рис. 3. Зависимость коэффициента нестабильности дугового процесса от тока наплавки и напряжения дуги при наплавке самозащитной порошковой проволокой ПП-АН130-1

ной оси отложена вероятность  $p$  появления определенного сочетания тока и напряжения в соответствующем участке плоскости  $(I_{св} - U_{св})$ . На диаграммах выделены области горения дуги и коротких замыканий. Поскольку обрывы дуги во время процесса наплавки редки и их длительность мала, плотность вероятности обрывов также очень мала и на графиках неразличима.

Из рис. 2 и табл. 2 видно, что с повышением напряжения дуги процесс становится более стабильным — уменьшается количество и продолжительность коротких замыканий и обрывов дуги. При напряжении 26 В короткие замыкания и обрывы дуги практически отсутствуют. Однако с повышением напряжения и соответственно длины дуги при наплавке самозащитной порошковой проволокой в наплавленном металле появляются поры.

Нестабильность процесса дуговой наплавки порошковой проволокой оценивалась коэффициентом нестабильности  $\gamma$ :

$$\gamma = [V(U_d) + V(I_d)]t_d + [V(U_{к.з}) + V(I_{к.з})]t_{к.з} + t_{об}N_{об} \quad (1)$$

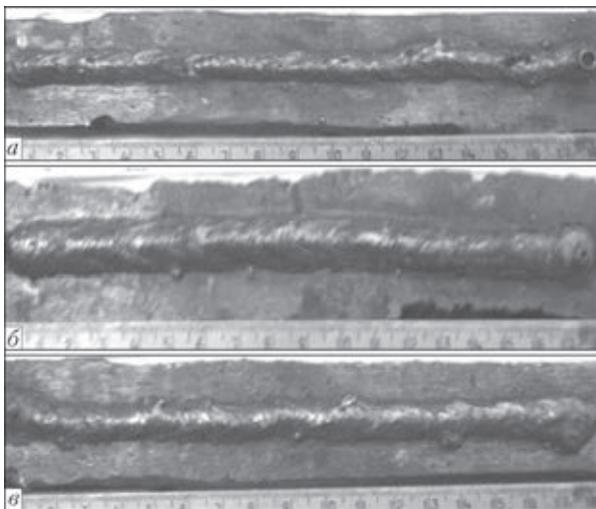


Рис. 4. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой ПП-АН130-1 на токах 200 А (а), 250 (б) и 300 (в), при постоянном напряжении 22 В и скорости наплавки 20 м/ч

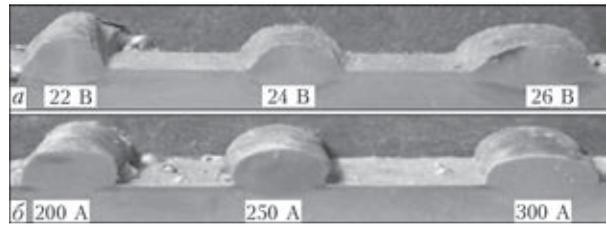


Рис. 5. Макрошлифы валиков, наплавленных порошковой проволокой ПП-АН130-1 на различных напряжениях (а) при одинаковом токе 250 А и различных токах при напряжении 24 В (б)

который представляет собой сумму коэффициентов вариации тока и напряжения горения дуги, коэффициентов вариации тока и напряжения коротких замыканий дугового промежутка, количества обрывов дуги, умноженных на весовые коэффициенты. В качестве весовых коэффициентов приняты удельные длительности горения дуги, коротких замыканий дугового промежутка и обрывов дуги.

По формуле (1) и данным табл. 2 получена зависимость коэффициента нестабильности процесса наплавки от тока и напряжения в виде регрессионной модели второго порядка. Геометрическое представление этой модели (поверхность отклика) приведено на рис. 3. В плоскости  $(I_{св} - U_{св})$  изображены также линии постоянного значения коэффициента нестабильности (линии равного отклика). Минимальное количество обрывов дуги и коротких замыканий наблюдается при напряжении 25 В. При этом напряжении и токе, изменяющемся в пределах 200...300 А, коэффициент нестабильности  $\gamma$  находится в пределах 0,5...0,32, и дуга горит наиболее стабильно. При снижении напряжения до 22 В и при тех же токах коэффициент нестабильности возрастает до 0,9...1,0.

Для исследования также влияния режимов наплавки на проплавление и на ДОМ в наплавленном металле использовали образцы, наплавленные на режимах, которые приведены выше. На рис. 4 для примера приведен внешний вид валиков, наплавленных на различных токах при напряжении 22 В и скорости наплавки 20 м/ч, а на рис. 5 — макрошлифы поперечного сечения этих валиков.

После наплавки произведена порезка всех образцов поперек наплавленных валиков. Из каждого образца изготовлено по восемь макрошлифов, на которых определяли среднюю по восьми замерам ДОМ в наплавленном металле  $g_0$  (табл. 2). Расчет производили по выражению

$$g_0 = \frac{F_0}{F_0 + F_H} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $F_0$  — площадь сечения расплавленного основного металла;  $F_H$  — площадь сечения наплавленного металла.

Как и для коэффициента нестабильности, получено регрессионное уравнение зависимости  $g_0$

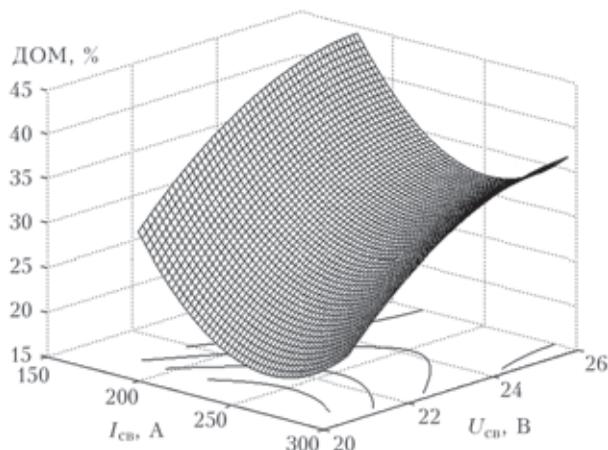


Рис. 6. Зависимость ДОМ в наплавленном металле от тока и напряжения дуги

от тока и напряжения. На рис. 6 изображена соответствующая поверхность отклика. Прослеживается тенденция снижения ДОМ при увеличении тока наплавки. Это связано с тем, что повышение тока наплавки напрямую связано с увеличением скорости подачи проволоки. При неизменной скорости наплавки это увеличивает количество наплавленного металла, приходящегося на единицу длины шва. Повышение напряжения с 22 до 24 В приводит к некоторому увеличению показателя  $g_0$  при всех значениях тока наплавки. Однако при дальнейшем увеличении напряжения до 26 В этот показатель не изменяется.

Оценены также связь между качеством формирования наплавленных валиков, ДОМ в наплавленном металле и показателями стабильности процесса наплавки. На рис. 7 приведены совмещенные двумерные сечения поверхности отклика для коэффициента нестабильности и ДОМ в наплавленном металле. Серым цветом выделена область оптимальных режимов, обеспечивающих достаточную стабильность процесса при минимальном проплавлении и хорошем формировании наплавленных валиков. В этой области можно выбрать такие режимы наплавки конкретной детали, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям ее эксплуатации, конструкции детали, требованиям к наплавленному металлу. В частности, если конструкция детали требует наплавки слоев большой толщины в несколько проходов, то можно выбрать более интенсивные режимы наплавки с достаточно большим проплавлением в первом проходе. При наплавке тонких слоев необходимо использовать режимы в области минимальной стабильности процесса наплавки с большим перекрытием соседних валиков.

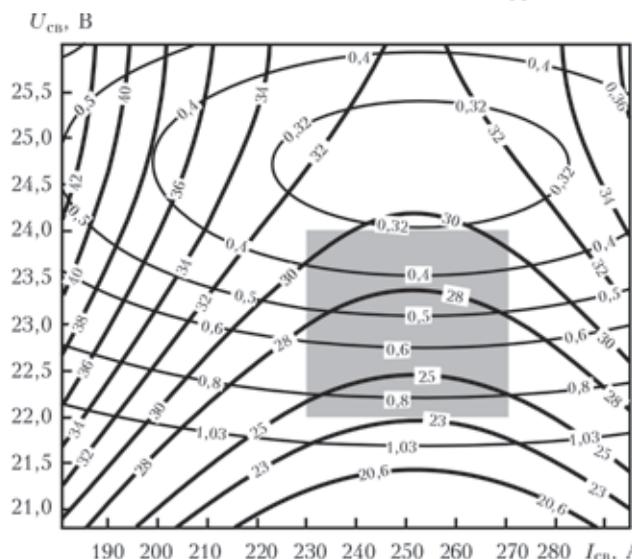


Рис. 7. Контурные кривые коэффициента нестабильности горения дуги и ДОМ в наплавленном металле

### Выводы

1. Установлено, что из экспериментальных самозащитных порошковых проволок типа ПП-АН130-1 наилучшими сварочно-технологическими свойствами по экспертным оценкам обладает проволока с газшлакообразующей системой  $\text{CaO}+\text{TiO}_2+\text{MgO}+\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ .

2. Нестабильность горения дуги в первую очередь зависит от напряжения и снижается с его увеличением. В проведенных экспериментах при использовании порошковой самозащитной проволоки диаметром 2 мм коэффициент нестабильности достигает минимума при 25 В. Ток в значительно меньшей степени оказывает влияние на нестабильность горения дуги. Для указанной проволоки минимальный коэффициент нестабильности наблюдается при токах 250...260 А.

3. Область оптимальных режимов наплавки, обеспечивающая достаточную стабильность процесса ( $\gamma = 0,32...0,8$  отн. ед.) при удовлетворительном проплавлении ( $g_0 = 23...30\%$ ), лежит в диапазоне изменения тока 230...270 А и напряжения 22...24 В.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков: Металлургиздат, 1961. – 421 с.
2. Влияние высокотемпературного термоциклирования на наплавленный металл типа штамповых теплоустойчивых сталей / И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев, А. А. Бабинцев и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 2. – С. 26–28.
3. Определение ресурса эксплуатации наплавленных деталей при циклических, термических и механических нагрузках / И. К. Сенченков, О. П. Червинко, И. А. Рябцев, А. А. Бабинцев // Свароч. пр-во. – 2013. – № 1. – С. 8–13.
4. Юзвенко Ю. А., Кирилук Г. А. Наплавка порошковой проволокой. – М.: Машиностроение, 1973. – 46 с.

Поступила в редакцию 06.03.2014