

Министерство высшего и среднего специального образования  
С О С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

РЫКОВ ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДУГОВОЙ  
НАПЛАВКИ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Специальность 05.04.05 -

"Технология и машины сварочного производства"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Челябинск - 1973

Работа выполнена на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
И. Р. ПАЦКЕВИЧ.

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, лауреат Ленинской премии  
Н. М. НОВОЖИЛОВ;
2. Кандидат технических наук Б. В. СТЕПАНОВ.

Ведущее предприятие - Челябинский тракторный завод  
им. В. И. Ленина.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1973 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1973 г.,  
в 15 часов, в аудитории 244 (конференцзал) на заседании Совета  
по присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов  
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Ваш отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенных  
печатью) просим направлять по адресу: 454044, Челябинск,  
проспект им. В. И. Ленина, 76, ЧИИ, Ученый Совет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета  
канд. техн. наук

  
(А. Э. Даммер)

Непрерывно развивающаяся сварочная наука и техника постоянно пополняет практику новыми технологическими процессами. Одним из новых направлений в сварочном производстве является разработка и применение механизированных способов сварки в газовых средах со значительным окислительным потенциалом. В качестве защитных сред используют углекислый газ, струю водяного пара, аргон и углекислый газ с добавлением кислорода, а также тройные смеси из аргона, углекислого газа и кислорода. Особое место занимает изучение способов сварки и наплавки родой электродной проволокой на воздухе. Уже сейчас разработанные в институте электросварки им. Е.О. Патона легированные электродные проволоки сплошного сечения позволяют производить механизированную сварку открытой дугой деталей из конструкционных сталей. При этом обеспечивается получение плотных швов с довольно высокими механическими свойствами.

Разновидностью способа сварки открытой дугой является разработанный в Челябинском политехническом институте способ наплавки и сварки в потоке воздуха, применение которого также позволяет получать плотный наплавленный металл, а его качество удовлетворит требованиям на некоторые виды сварочных работ. Возможность использования простых углеродистых проволок и отсутствие необходимости в специальных защитных средах делают этот способ одним из самых экономичных в настоящее время.

Наплавка в потоке воздуха начинает находить применение при восстановлении стальных и чугунных деталей автомобилей, тракторов, сельхозмашин. Однако преимущества этого нового способа реализуются далеко не полностью. Одной из основных причин, тормозящих его широкое внедрение в производство, является недостаточная изученность особенностей и технологических характеристик способа наплавки и сварки в потоке воздуха. Отсутствие данных по выбору оптимальных режимов и рациональной области применения способа также сдерживает его практическую реализацию.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей процесса наплавки в потоке воздуха, определению на этой основе оптимальных режимов, обеспечивающих получение качественного наплавленного металла, и области рационального применения способа.

Диссертация состоит из четырех глав.

В первой главе описаны сущность способа наплавки в потоке воздуха, его особенности, дан обзор работ, посвященных исследованию способа. В заключении главы изложены основные задачи, общая методика и план проведения исследований.

Некоторые характеристики процесса наплавки в потоке воздуха исследовались И.Р.Пацкевичем, Г.Д.Куликовым, П.А.Нориним, Л.С.Саширо и другими советскими учеными, в работах которых установлено, что подача струи воздуха в зону горения дуги накладывает свои особенности на многие характеристики процесса дуговой сварки, связанные с взаимодействием расплавленного металла с газовой средой.

Так, струя воздуха повышает выгорание легирующих элементов из электродного и основного металлов, в значительной степени влияет на насыщение расплавленного металла газами. С увеличением расхода воздуха повышается содержание азота и кислорода в наплавленном металле. Насыщение водородом несколько снижается. При этом понижается пористость наплавленного металла.

Наряду с этим, как следует из литературного обзора, в настоящее время отсутствуют исследования некоторых важных характеристик способа, без знания которых успешное практическое применение его затруднительно. Например, нет работ, посвященных изучению плавления и переноса электродного металла при наплавке в потоке воздуха. Исследование этого вопроса позволит определить области с наиболее устойчивыми режимами и наименьшим разрыванием электродного металла. В этой связи уместно отметить, что одним из наименее изученных вопросов дуговой сварки является процесс испарения электродного металла. Исследование его, по моему мнению, будет способствовать изучению переноса электродного металла не только при наплавке в потоке воздуха, но и при других дуговых способах сварки, а также содействовать изучению кинетики выгорания легирующих элементов и состава газовой атмосферы в зоне горения дуги.

Отсутствуют систематические исследования по влиянию отдельных параметров режима наплавки, состава электродного и основного металла на пористость наплавленных слоев, что затрудняет выбор оптимальных режимов, при которых получается плотный наплавленный металл. Мало данных по влиянию режимов наплавки на формирование наплавленного металла и его механические свойства. Отсутствуют

исследования энергетических особенностей сварочной дуги, обдуваемой воздухом, нет работ, посвященных изучению влияния состава электродных проволок, на пластические свойства сварных швов, выполненных в потоке воздуха.

Основной целью реферируемой работы явилось определение оптимальных режимов наплавки, обеспечивающих удовлетворительное качество наплавленного металла, и установление рациональных областей применения способа при использовании простых углеродистых проволок.

В связи с изложенным, наша работа была направлена на решение следующих задач:

1. Исследование влияния расхода воздуха и других параметров режима на характеристики плавления, испарения, переноса и разбрызгивания электродного металла.

2. Исследование влияния расхода воздуха и других параметров режима на пористость наплавленного металла, разработка методики определения оптимального расхода воздуха в зависимости от режимов наплавки и содержания углерода в электродной проволоке, оценка роли отдельных газов в образовании пор при наплавке в потоке воздуха.

3. Исследование особенностей формирования наплавленного металла и его механических свойств, определение области рационального применения способа и разработка технологии наплавки некоторых деталей строительных машин.

4. Внедрение результатов исследований в производство.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей плавления, испарения и переноса электродного металла. Скорость плавления и испарения определялась по методике, основанной на задании времени горения дуги меньшего, чем время существования капли жидкого металла на конце электрода. Для этого была спроектирована и изготовлена установка, обеспечивающая продолжительность горения дуги, начиная с 0,01 сек до 2 сек, с шагом регулирования длительности дугового разряда 0,01 сек. Опыты проводились на образцах длиной 30 мм, изготовленных из электродных проволок Св-08А, Св-08Г2С и У8А диаметром 2 мм. Образцы до опыта взвешивались и замерялась их длина. После оплавления на микроскопе устанавливалось положение границы оплавления и определялась

длина нерасплавленной части стержня. По разности веса стержня до опыта и вычисленного веса его нерасплавленной части находился вес расплавленного металла. Вес испаряющегося металла определялся по разности веса электрода до оплавления и после. В случае оплавления в окислительных средах капли на электродах были покрыты шлаком, поэтому образцы взвешивались после отделения шлака. По весу шлака и его химическому составу делалась поправка на вес кислорода, при объединяющемся во время опыта.

В результате экспериментальных исследований установлено, что изменение массы расплавленного металла с течением времени при сварке в потоке воздуха при постоянных силе тока и напряжении (в исследованном интервале времени горения дуги 0,01–0,1 сек) носит линейный характер. С увеличением силы тока скорость плавления электрода увеличивается. Изменение напряжения дуги в пределах 25–32,1 в и расхода воздуха от 0 до 2400 л/час на скорость плавления электрода при сварке на обратной полярности практически не влияет. Последнее обстоятельство позволило массу расплавленного металла в зависимости от силы тока и времени горения дуги определить формулой

$$m_p = 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot J^{1,25} \cdot t, \quad (1)$$

где  $J$  – сила тока, а;  
 $t$  – время горения дуги, сек.

Аналогичная зависимость получена для массы испаряющегося электродного металла, которая при сварке на обратной полярности увеличивается с повышением силы тока, пропорциональна времени и практически не зависит от напряжения на дуге. Установленную зависимость массы испаряющегося металла от силы тока и времени при нулевом расходе воздуха можно описать уравнением:

$$m_u = 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot J^{1,32} \cdot t. \quad (2)$$

С ростом расхода воздуха от 0 до 2400 л/час количество испаряющегося электродного металла увеличивается на 12–14%. Тогда формулу для определения массы испаряющегося электродного металла с учетом влияния расхода воздуха можно записать в виде:

$$m_u = 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot J^{1,32} \cdot t (1 + 5,4 \cdot 10^{-6} Q), \quad (3)$$

где  $Q$  – расход воздуха, л/час.

На основании формул (I) и (3) получим:

$$\frac{m_u}{m_p} = 5,4 \cdot 10^{-2} J^{0,07} (1 + 5,4 \cdot 10^{-5} Q) \quad (4)$$

Примерно такой же характер, как при сварке в потоке воздуха, носит отношение  $m_u/m_p$  при сварке в других исследованных газовых средах. В таблице I приведены средние значения относительного количества испаряющегося электродного металла  $m_u/m_p$  при  $t = 0,06$  сек,  $J = 100-500$  а и расходе газов 1200 л/час.

Таблица I

Полярность	$m_u/m_p, \%$				$\Delta p,$ г/в час
	$A_2$	$N_2$	$CO_2$	воздух	
Прямая	-	-	4,6	6,6	20 - 31,7
Обратная	1,0-1,5	4,0	6,4	8,4	11,0-14,5

Данные таблицы I свидетельствует о заметном влиянии газовой среды на интенсивность испарения. Испарение усиливается с увеличением теплопроводности газа и его окислительной способности. Наименьшее испарение наблюдается в аргоне, который обладает наиболее низкими теплопроводностью и окислительной способностью. Азот, воздух и углекислый газ имеют близкую теплопроводность, но отличаются окислительной способностью. Увеличение теплопроводности газа способствует сжатию столба дуги и более концентрированному выделению энергии в активном пятне. Повышение испарения с увеличением содержания кислорода в газе связано с окислением паров и снижением их парциального давления у поверхности расплавленного металла. С ростом расхода воздуха происходит отдувание паров металла от поверхности мелкой капли и повышается уровень снабжения зоны дуги кислородом - испарение увеличивается.

Учитывая, что испарение и окисление при дуговой сварке тесно связаны, уместно рассмотреть процесс окисления некоторых составляющих электродного металла. Доля окисляющегося металла определялась по количеству шлака, образующегося на каплях при быстром их охлаждении на медном диске. Результаты обработки

экспериментальных данных по определению доли окисляющегося и испаряющегося электродного металла в процентах от содержания элементов в проволоке (Св-08Г2С) при  $Q = 2400$  л/час, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о том, что основная часть Mn и Si теряется в результате испарения. Потери Mn и Si на окисление составляют соответственно 10 и 15% от их общих потерь. Доля потерь Fe на окисление еще меньше.

Таблица 2

Показатели			Элементы		
			Mn	Si	Fe
Общие потери в % от содержания элементов в проволоке			44,5	16	8,48
В том числе	потери на окисление	в %	4,5	2,4	0,48
		в долях от общих потерь	0,1	0,15	0,057
	потери на испарение	в %	40	13,6	8,0
		в долях от общих потерь	0,9	0,85	0,943

Однако следует отметить, что во время нахождения капли на электроде часть шлака могла испаряться. Качественным критерием степени испарения элементов и их соединений может служить давление паров над металлом и его окислами. Давление паров над элементами и их соединениями является линейной функцией тепловых эффектов их возгонки и может быть определено по следующим уравнениям:

$$R \ln P_T^0 = -\frac{L_{Mn}}{T} + 25 + 7 \cdot 10^{-5} L_{Mn} + (5,6 \cdot 10^{-6} L_{Mn} + 6,0) \frac{T - 1000}{2000} \quad (5)$$

$$- R \ln P_{A_n B_n (T)}^0 = -\frac{L_{CO}}{T} + 30 + 2P + 5,8 \cdot 10^{-5} L_{CO} + (6,6 \cdot 10^{-5} L_{CO} - 13,2) \frac{T - 1000}{2000} \quad (6)$$

где  $R \ln P_T^0$  - логарифм давления пара над элементом;

$R \ln P_{A_n B_n (T)}^0$  - логарифм давления пара над соединением  $A_n B_n$ ;

$L_{Mn}$  - тепловой эффект возгонки элемента, кал/моль;

$L_{CO}$  - тепловой эффект возгонки соединения, кал/моль;

$T$  - температура, °К ;



$n$  - число атомов в молекуле;

$R$  - газовая постоянная (1,98725 кал/моль·град).

Значения давления паров элементов и их окислов, подсчитанных нами по уравнениям (5) и (6), приведены в таблице 3, из которой следует, что при температурах капля электродного металла (2000-3000°K) давление паров над Fe, Mn и Si в 5 - 40 раз выше, чем над их окислами.

Таблица 3

T, °K	$-\lg p^{\circ}$					
	Fe	FeO	Mn	MnO	Si	SiO <sub>2</sub>
1000	13,9	19,1	7,15	16,3	12,9	20,0
2000	3,77	5,1	0,775	4,33	3,08	5,25
2600	1,53	2,28	-0,55	1,78	1,06	2,26
3000	0,57	1,0	-1,09	0,74	0,2	0,99
3500	-0,274	0,114	-1,5	-0,16	-0,56	-0,12

Результаты экспериментальных исследований и термодинамических расчетов позволяют заключить, что часть металла окисляется на поверхности капли, где нет активного пятна, и частично испаряется в виде окислов. Другая, наибольшая доля, сначала испаряется в районе активного пятна, а затем, попадая в менее нагретые зоны, окисляется. Исследования истечения паров с помощью скоростной кинесъемки и распределения легирующих элементов по сечению капель с помощью рентгеновского микроанализатора также подтверждают такое заключение. Пары истекают в основном из области активного пятна, а содержание легирующих элементов наименьшее в зоне существования активного пятна.

В процессе сварки в потоке воздуха испаряется 7-10% от общего количества расплавленного электродного металла. Остальная же часть переносится в виде различных по величине капель, которые являются основной формой переноса электродного металла. Размер капли и время ее существования, по данным В.И. Дятлова, определяются следующими основными силами: силой тяжести  $P_g$ , поверхностного натяжения  $P_{\text{пл}}$ , электромагнитными силами (пинч-эффект)  $P_{\text{эм}}$ , реактивным давлением паров  $P_{\text{п}}$ . Условие существования капли на конце электрода

$$P_g + P_{эм} \leq P_{пн} + P_n \quad (7)$$

Выполненные исследования позволили найти силу реактивного давления паров, истекающих из анодного пятна, которая определяется массой испаряющегося металла в единицу времени  $m_{\text{ис}}$  и скоростью его истечения  $W_n$

$$P_n = m_{\text{ис}} \cdot W_n \quad (8)$$

Скорость газа

$$W_n = V_n \cdot \rho_n \quad (9)$$

где  $V_n$  - удельный объем пара металла при температуре кипения,  $\text{см}^3/\text{г}$ ,

$\rho_n$  - удельное испарение металла с активного пятна,  $\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$ .

С учетом (3) для процесса с расходом воздуха 1200 л/час

$$\rho_n = 5,26 \cdot 10^{-5} J^{1,32} \quad (10)$$

Приняв, что радиус анодного пятна равен радиусу столба дуги

$$r_{ан} = \frac{J^{2/3}}{1,25 U^{3/2}} \quad (11)$$

( $U_1$  - эффективный потенциал ионизации, в) определим площадь анодного пятна и, подставляя соответствующие значения в (8), получим

$$P_n = 0,29 J^{1,32} \quad (12)$$

Уравнение (7) в развернутом виде с учетом (1), (12) запишется в виде:

$$9,1 \cdot 10^{-4} J^{1,25} t \cdot g + 10^{-2} J^2 \ln \frac{r_{ан}}{r_{эл}} \leq 297 \cdot z_{эл} \cdot \sigma_{пн} + 0,29 J^{1,32} \quad (13)$$

где  $t$  - время, сек;

$g$  - ускорение свободного падения тела,  $\text{см}/\text{сек}^2$ ;

$r_{ан}$  - радиус анодного пятна, см;

$r_{эл}$  - радиус электрода, см;

$\sigma_{пн}$  - поверхностное натяжение, которое для сварки на воздухе было принято 800 дин/см.

Анализ уравнения (13), решенного относительно  $t$  при различных значениях  $J$  показал, что с увеличением  $J$  время существования капли и ее вес уменьшаются. Экспериментальные исследования переноса электродного металла с помощью скоростной киносъемки, осциллографирования и наплавки на быстровращающийся медный диск подтверждают такую закономерность. Одновременно было установлено, что с увеличением расхода воздуха при прочих равных условиях размер капель несколько уменьшается. Особенно это заметно при повышенном напряжении дуги. Последнее обстоятельство связано с увеличением насыщения металла кислородом и повышением температуры капель (установлено в работе в результате калориметрирования процесса), что снижает поверхностное натяжение и способствует отделению капли. Наряду с этим при значительных  $U_d$  отмечается повышенное разбрызгивание электродного металла, которое происходит в результате взрывов капель под действием образующейся внутри их  $CO$ . Этому способствует рост температуры и насыщение металла кислородом, так как свободная энергия образования  $CO$  с увеличением температуры становится выше, чем при образовании соединений кислорода с  $Fe$ ,  $Mn$ ,  $Si$ .

Другим видом разбрызгивания, более неприятным, является разбрызгивание целыми крупными каплями, которое происходит в результате совместного действия сил реактивного давления паров, истекающих из анодного пятна, электромагнитных сил и сил возникающих в результате перегорания перемычки между каплей и электродом. Под действием реактивного давления паров капля приподнимается и часто занимает положение перпендикулярное оси электрода. Если в этот момент происходит разрушение перемычки, то равнодействующая сил давления паров и взрыва перемычки получается направленной в сторону от ванны, и капля отлетает на значительное расстояние.

Для снижения разбрызгивания электродного металла необходимо не допускать образования крупных капель, что достигается снижением напряжения. Поэтому в потоке воздуха наиболее рационально наплавку вести с короткими замыканиями. На рис. 1 представлена область наиболее устойчивых режимов наплавки, обеспечивающих наименьшее разбрызгивание при расходе воздуха от 0 до 2400 л/час.

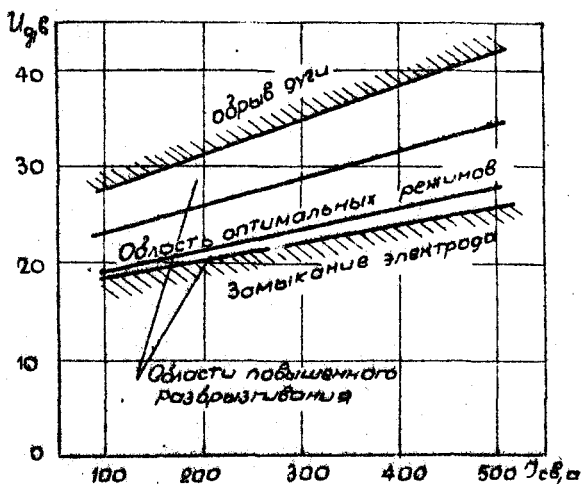


Рис. I. Область оптимальных режимов

В третьей главе приводятся результаты исследований пористости металла при наплавке в потоке воздуха.

Степень пористости наплавленных валиков оценивалась по рентгенограммам. Содержание кислорода, азота и остаточного водорода определялось методом вакуум-плавления, а диффузионный водород замерялся в глицериновых эвдиометрах.

Подсчет скрытого суммарного давления газов для валиков, наплавленных в потоке воздуха, показал, что скрытое давление газов достигает значительных величин. При этом валики получаются плотными. Так, суммарное давление  $P_{CO}$ ,  $P_{N_2}$  и  $P_{H_2}$  для плотных валиков составило 15,357 атм. ( $P_{CO} = 1,28$  атм.,  $P_{N_2} = 14$  атм.,  $P_{H_2} = 0,077$  атм.). Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что при наплавке в потоке воздуха, когда в металле содержится значительное количество газов, наряду со степенью пересыщения важную роль в образовании пор играют кинетические факторы и влияние одних газов на поведение других. С увеличением расхода воздуха содержание  $O_2$  и  $N_2$  увеличивается, а водорода уменьшается.

Пористость же сначала снижается, а при дальнейшем повышении расхода воздуха увеличивается. При наплавке в спокойной атмосфере пористость возрастает с увеличением содержания углерода в электродной проволоке и снижается с увеличением времени существования ванны. Подача струи воздуха в зону горения дуги снижает пористость. Это дает основание полагать, что при недостаточном расходе воздуха поры в основном образуются за счет вялого выделения окиси углерода и некоторого количества азота. С увеличением расхода воздуха повышенное насыщение расплавленного металла кислородом интенсифицирует образование и выделение  $CO$  до кристаллизации ванны. По мере увеличения содержания углерода в расплавленном металле роль азота в процессе порообразования снижается. Это можно объяснить во-первых, снижением его концентрации в расплавленном металле в результате дегазации ванны всплывающими пузырьками  $CO$  и защитным действием  $CO$  над поверхностью ванны. Во-вторых, наличие углерода в стали снижает скорость диффузии атомов азота и образующиеся зародыши пузырьков от азота не успевают развиться до видимых размеров. Аналогично действует кислород, который являясь поверхностно-активным элементом затрудняет переход азота в пузырьки. Незначительная концентрация водорода в наплавленном металле, ниже предела растворимости, свидетельствует о слабом его влиянии на образование пор при наплавке в потоке воздуха. Для проверки к воздуху ( $Q = 2400$  л/час), обеспечивающему на определенных режимах получение плотных валиков, добавляли различное количество водорода. Поры в наплавленных валиках появлялись при добавлении  $H_2$  к воздуху в количестве 5% и более, когда его скрытое парциальное давление в металле приближалось к атмосферному или превышало его.

Анализ зависимостей относительной площади пор от режимов наплавки позволил установить, что наименьшая пористость получается при определенном соотношении величины расхода воздуха и тепловой энергии. В результате обработки экспериментальных данных была получена формула для определения оптимального расхода воздуха, обеспечивающего в зависимости от режимов наплавки и содержания углерода в электродной проволоке при наплавке на сталь 45 получение плотного металла:

$$Q = 10^5 \sqrt{\left[ \frac{(3,8 + 3,9C) V_{сб}}{C_{сб} U_2} \right]^2} \quad (14)$$

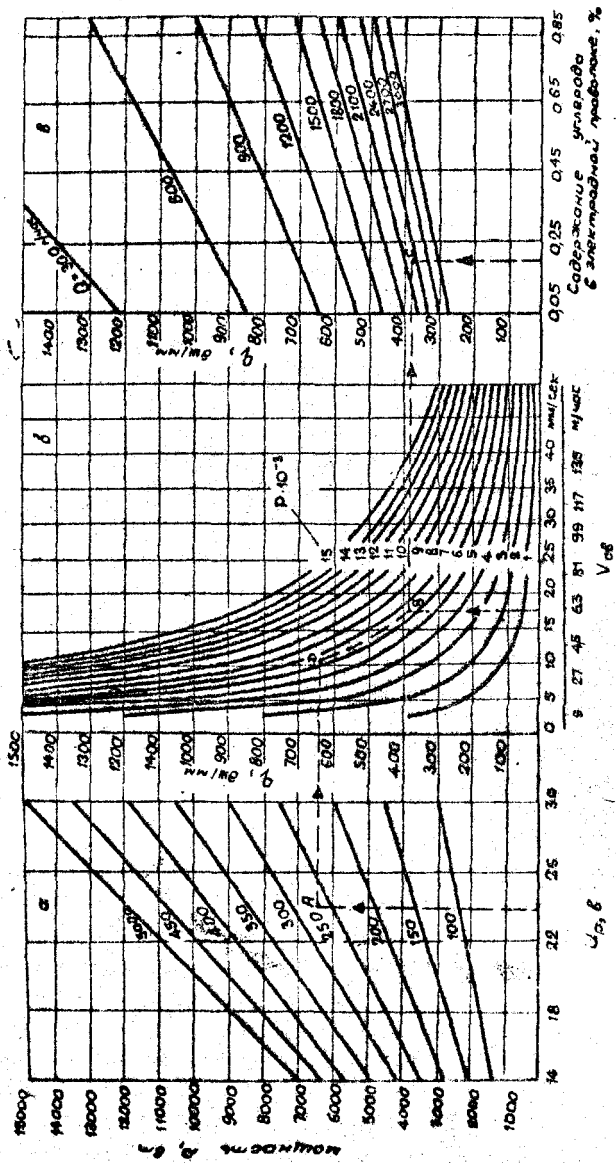


Рис. 2. Номограмма определения расхода воздуха

- где  $C$  - концентрация углерода в электродной проволоке, %;  
 $V_{св}$  - скорость наплавки, мм/сек;  
 $I_{св}$  - сила тока, а;  
 $U_{д}$  - напряжение дуги, в.

Для практического пользования была разработана номограмма определения оптимального расхода воздуха (Рис.2).

Четвертая глава состоит из трех параграфов.

В первом приводятся исследования по влиянию режимов наплавки на формирование наплавленных валиков. Увеличение силы тока и снижение скорости наплавки до определенных значений увеличивает все размеры валиков. Повышение напряжения дуги вызывает увеличение ширины шва. Глубина проплавления практически не меняется. С ростом расхода воздуха при прочих одинаковых условиях увеличивается глубина проплавления и несколько снижается ширина шва. Причиной увеличения глубины проплавления является радиальное сжатие столба дуги в результате обдува ее потоком воздуха и более концентрированный подвод энергии к основному металлу.

Во втором разделе приводятся исследования структуры и механических свойств наплавленного металла. Установлено, что твердость и износостойкость наплавленного металла в значительной степени зависит от режимов наплавки. Изменение режимов наплавки, состава электродных проволок, расхода охлаждающей жидкости и места ее подвода позволяет регулировать механические свойства наплавленного металла в широких пределах.

В третьей части рассматриваются вопросы практического применения способа наплавки в потоке воздуха. Приводятся результаты применения способа вибродуговой наплавки в потоке воздуха чугунных и стальных деталей автомобилей и тракторов. На основании проведенных исследований разработана технология восстановления деталей ходовой части строительных машин невибрирующим электродом. Стоимость восстановления деталей составляет 7-14% стоимости новых. В результате внедрения двух установок для автоматической наплавки деталей ходовой части строительных машин в строительном управлении "Земстрой" треста "Южуралспецстрой" и Кировском управлении треста "Севэкскавация" получен годовой экономический эффект в размере 47 тыс. рублей.

Наряду с наплавкой способ может быть использован и для сварки конструкций, не несущих динамической и значительной

знакопеременной нагрузки. В таком случае однопроводная сварка в потоке воздуха может применяться взамен электродов типа Э-46. Наиболее рационально использовать способ для сварки тонколистового металла.

## ВЫВОДЫ

Способ сварки и наплавки в потоке воздуха является разновидностью электрической сварки плавлением открытой дугой. Подача струи воздуха накладывает свои особенности на многие процессы, протекающие в зоне горения дуги, изучение которых будет способствовать наиболее эффективному практическому использованию способе.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено:

1. При сварке в потоке воздуха скорость перемещения границы оплавления электрода в процессе образования одной капли постоянна. Скорость плавления электродной проволоки увеличивается с ростом силы тока. Величина напряжения дуги и расхода воздуха при сварке на обратной полярности практически не влияет на скорость плавления электрода.

2. Испарение электродного металла увеличивается с повышением силы тока и расхода воздуха. При этом анализ вида потерь легирующих элементов показал, что при сварке в потоке воздуха основная часть потерь приходится на испарение. Количество испаряющегося металла увеличивается с увеличением расхода воздуха и окислительного потенциала газовой среды вследствие окисления и отдувания элементов в парообразном состоянии и снижения их парциального давления у поверхности расплавленного металла.

3. На основании экспериментальных данных получена зависимость величины реактивного давления паров на каплю электродного металла от силы тока. Это позволило более точно составить баланс сил, действующих на каплю и определить влияние силы тока на размеры и время существования электродных капель.

4. Подача воздуха в зону горения дуги уменьшает размер капель, что можно объяснить снижением поверхностного натяжения и вязкости металла капли вследствие её насыщения кислородом и повышением температуры металла за счет теплового эффекта реакций окисления.



5. Подача струи воздуха в зону горения дуги снижает разбрызгивание при режиме сварки с короткими замыканиями и увеличивает его при сварке длинной дугой.

6. При увеличении расхода воздуха содержание кислорода и азота в наплавленном металле увеличивается, а водорода несколько снижается. Суммарное скрытое давление газов в наплавленном металле при подаче струи воздуха в зону горения дуги во много раз превышает атмосферное. Не смотря на это получают плотные швы.

7. Пористость наплавленного металла в зависимости от расхода воздуха имеет минимум. С увеличением содержания углерода в электродной проволоке или основном металле минимум смещается в сторону увеличения расхода воздуха.

8. Поры в наплавленном металле при подаче струи воздуха в зону горения дуги образуются в основном от азота и окиси углерода. Роль водорода в образовании пор незначительна и проявляется лишь при добавлении его к воздуху в количестве 5-10%, когда скрытое парциальное давление водорода приближается к одной атмосфере или превышает его.

9. На основании результатов исследований пористости наплавленного металла разработана номограмма для определения оптимального расхода воздуха, обеспечивающего получения плотного наплавленного металла в зависимости от режимов наплавки и содержания углерода в электродной проволоке.

10. Возможность использования для наплавки в потоке воздуха электродных проволок с различным содержанием углерода и изменения твердости, износостойкости наплавленного металла в широких пределах позволяет применять наплавку в потоке воздуха для восстановления различных деталей из стали и чугуна, которые не подвергаются значительным ударным и знакопеременным нагрузкам.

11. Механические испытания сварных соединений показали, что способ сварки в потоке воздуха может быть использован для изготовления конструкций, не несущих ударных и знакопеременных нагрузок, взамен электродов типа Э-46. Наиболее рационально применять сварку в потоке воздуха для изготовления конструкций из тонколистового металла.

12. Применение способа сварки и наплавки в потоке воздуха показало его высокую эффективность. Внедрение двух автоматичес-

ких установок для наплавки в потоке воздуха при восстановлении деталей строительных машин (в С.У. "Земстрой" треста "Урал-спецстрой" и Кировском С.У. треста "Севзакскавация") позволило получить годовой экономический эффект свыше 47 тыс. рублей.

Диссертация содержит 175 страниц, включая 52 рисунка и 25 таблиц. Список используемой литературы включает 173 источника. Число приложений 2.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Пацкевич И.Р., Рыков О.А., Маришкин А.К. методика и некоторые результаты экспериментального исследования, испарения и окисления электродного металла. Сб. "Исследование и применение вибродуговой наплавки", Челябинск, 1968.

2. Пацкевич И.Р., Рыков О.А., Маришкин А.К., Потаушкин В.Ф. Анализ вида потерь электродной проволоки при сварке в потоке воздуха. Сб. научных трудов ЧИИ № 82, Челябинск, 1969.

3. Рыков О.А., Пацкевич И.Р. Исследование влияния режимов при наплавке в потоке воздуха на пористость наплавленного металла. Сб. "Централизованное восстановление деталей машин", Саратов, 1969.

4. Пацкевич И.Р., Рыков О.А. Влияние реакций окисления на тепловой баланс наплавки в потоке воздуха. Сб. "Прогрессивная технология в сварочном производстве", вып. 2, Воронеж, 1969.

5. Пацкевич И.Р., Маришкин А.К., Потаушкин В.Ф., Рыков О.А. Тиристорный преобразователь для исследования плавления и испарения электродного материала методом импульсного оплавления. Сб. № 76, "Технология и оборудование сварочных процессов", Пермь, 1970.

6. Рыков О.А., Норин П.А. О влиянии состава газовой среды сварочной зоны на пористость наплавленного металла. Материалы XXII научно-технической конференции ЧИИ, Челябинск, 1974.

7. Норин П.А., Куликов Р.Д., Пирогова В.Д., Рыков О.А. Наплавка в потоке воздуха невибрирующим электродом. Сб. Материалы XXII научно-технической конференции ЧИИ, Челябинск, 1970.

8. Норин П.А., Рыков О.А. О порообразовании при сварке и наплавке открытой дугой. Сб. "Сварочное производство, автоматизация, новые методы и материалы", Ижевск, 1971.

9. Рыков О.А. Влияние режима наплавки в потоке воздуха на форму и размеры наплавляемых валиков. Сб. "Сварочное производство, автоматизация, новые методы и материалы". Ижевск, 1971.

10. Пацкевич И.Р., Рыков О.А. Исследование испарения и окисления электродного металла при сварке в газовых средах. "Автоматическая сварка", 1971, № 8.

11. Куликов Г.Д., Рыков О.А., Хейфец А.Л., Рискин А.Э. Дуговая наплавка деталей в потоке воздуха. Сб. "Прогрессивные методы сварки и наплавки в черной металлургии и машиностроении", Жданов, 1972.

12. Рыков О.А. Определение оптимального расхода воздуха при автоматической наплавке в потоке воздуха. Сб. научных трудов ЧПИ № 100, Челябинск, 1972.

13. Попков А.М., Рыков О.А. Теплосодержание и температура капель электродного металла при сварке в окислительной среде. "Сварочное производство", 1973, № 1.

#### Материалы работы доложены:

1. На научно-технической конференции по вибродуговой наплавке, г. Челябинск, 1968.

2. На научно-производственном семинаре по централизованному восстановлению деталей машин", г. Саратов, 1969.

3. На научно-технической конференции, г. Воронеж, 1969.

4. На симпозиуме по вопросам теории и практики сварочного производства, г. Челябинск, 1969.

5. На УШ научно-технической конференции сварщиков Урала, г. Пермь, 1969.

6. На семинаре "Наплавка металлов", проводимом ЛДНТП 24-26 февраля 1970 г., Ленинград.

7. На научно-технической конференции вузов Урала по машиностроению, Ижевск, 1970.

8. На XXIII научно-технической конференции ЧПИ, Челябинск, 1970.

9. На Всесоюзной научно-технической конференции по прогрессивным методам сварки и наплавки в черной металлургии и машиностроении, г. Жданов, 1972.