

ЭТАПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ В СУДОСТРОЕНИИ (Обзор)

В. Д. ГОРБАЧ, канд. техн. наук, **В. С. ГОЛОВЧЕНКО**, д-р техн. наук
(Центр. науч.-исслед. ин-т технологии судостроения, Санкт-Петербург, РФ)

Приведены результаты разработки и внедрения технологии электродуговой сварки под флюсом сталей и конструкций, используемых для корпусов судов, что обеспечило возможность строительства современных судов с высокими качеством и эффективностью.

Ключевые слова: сварка под флюсом, сварные конструкции, судостроение, разработки, исследование

Переход от клепаных конструкций судов к цельно-сварным, начатый в речном судостроении в середине 1930-х годов, создал условия для отказа от мелкоузлового способа постройки корпуса судна и перехода на секционный, что позволило перенести значительный объем сборочных и сварочных работ в закрытые цеха [1–3].

В этот период все сварные соединения выполняли ручной сваркой «голыми» электродами или с ионизирующей (меловой) обмазкой. Вследствие значительного окисления и насыщения азотом расплавленного металла наблюдалось повышение прочности и значительное снижение пластичности металла шва (до $\delta \leq 3\%$) [4, 5]. Это ограничивало область применения электродуговой сварки. Она не допускалась для выполнения стыковых соединений корпуса судна, а находила применение лишь для сварки набора и приварки его к обшивке корпуса судна.

По этой же причине первоначально сварку стали начали применять в речном судостроении [5]. Переход на постройку корпусов морских судов сдерживался также отсутствием надежных, хорошо свариваемых сталей.

Серьезный толчок к внедрению сварки в судостроении был сделан в связи с изобретением в 1939–1940 гг. в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР скоростной автоматической сварки проволочным электродом под флюсом [6].

Существенным вкладом в становление сварки под флюсом было также создание в 1941 г. в ЦНИИТМАШе плавного флюса ОСЦ-45, который и до настоящего времени широко используется в различных отраслях промышленности при автоматической сварке сталей обычной, средней и повышенной прочности.

Практическую реализацию концепции перехода от клепки к сварке в судостроении осуществлял трест «Оргсудопром», созданный в 1939 г. и в 1948 г. преобразованный в Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения (ЦНИИТС), ставший впоследствии известным крупным научным центром по созданию технологии постройки современных судов [2, 3].

В этот период научно-исследовательские работы в области сварки в ЦНИИТС выполняли в тесном взаимодействии с известными научными центрами по сварке (ИЭС им. Е. О. Патона, ЦНИИТМАШ, ЛПИ им. М. И. Калинина, завод «Электрик» и т. д.) и другими специалистами в области технологии судостроения [1–3].

В начальный период развития сварки для корпусов судов применяли низкоуглеродистые стали марок Ст3, Ст4 и Ст5, сварку которых выполняли ручным способом электродами руднокислого типа ОММ-2 (ТК) и ОММ-5. Для цельносварных корпусов морских судов предлагалось использование низколегированных сталей повышенной прочности.

Введение в практику судостроения секционного способа постройки создало условия для применения нового по тому времени технологического процесса — автоматической дуговой сварки. К 1937 г. в ИЭС им. Е. О. Патона принципиально были разработаны два способа автоматической сварки. Первый основывался на применении проволоки со стабилизирующим тонким покрытием, а второй — на использовании проволоки крестового сечения с толстым покрытием. В этот же период в ИЭС им. Е. О. Патона был создан первый в СССР сварочный самоходный аппарат-трактор для автоматической сварки в судостроении. Возможность применения аппаратов подобного типа в судостроении ранее никем не была доказана и признана [6, 7].

Одновременно (с 1946 г.) в «Оргсудопроме» были возобновлены, начатые в 1940 г. и прерванные войной, работы по созданию и внедрению технологии автоматической сварки под флюсом взамен ручной сварки покрытыми электродами. Еще до войны было установлено, что для автоматической сварки сталей Ст4, Ст5 и 20Г наиболее приемлемым является флюс марки ОСЦ-45, с применением которого обеспечиваются высокие технологические свойства металла шва, его наименьшая склонность к образованию пор и наиболее высокие показатели механических свойств сварного соединения. В этот же период было показано, что автоматическая сварка под флюсом возможна только в нижнем положении и обеспечивает производительность сварочных работ в 5...6 раз более высокую, чем при ручной сварке покрытыми электродами [3, 6, 7].

Эти особенности сварки в послевоенный период, с одной стороны, вызывали потребность ее скорей-

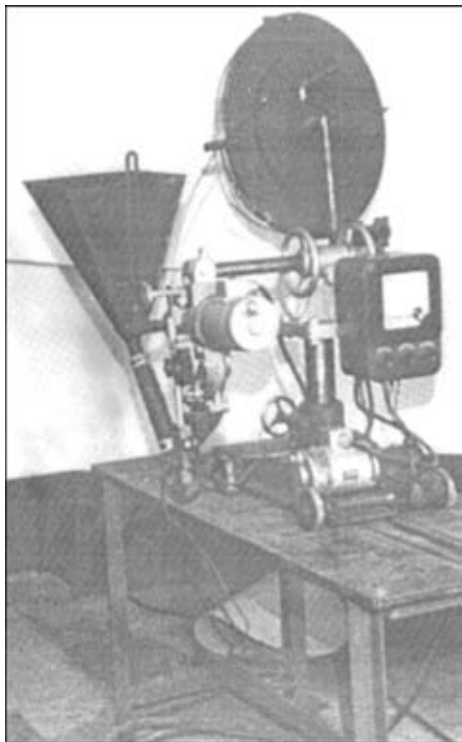


Рис. 1. Первый автомат МАГ-1 для сварки под флюсом стыковых соединений судовых конструкций

шего и более широкого внедрения, а с другой, — необходимость исследовать и разрабатывать технологию сварки всех применявшихся в то время судокорпусных сталей марок Ст3, Ст4, 10ХСНД, 15ХСНД, 10ХСН2Д и др. толщиной от 7 до 50 мм.

Исследования и разработку технологии автоматической сварки производили с одновременной отработкой созданного трестом «Оргсудопром» еще в 1944 г. опытного образца автомата МАГ-1 (рис. 1), серийный выпуск которого с 1946 г. сыграл решающую роль во внедрении автоматической сварки под флюсом при выполнении стыковых соединений судовых корпусных конструкций толщиной 7... 50 мм. В это же время была отработана технология автоматической сварки под флюсом стыковых соединений тонких (2... 7 мм) листов.

Принципиальные вопросы автоматической сварки под флюсом стыковых соединений в нижнем положении основных марок сталей были решены к 1948–1951 гг., что позволило существенно снизить объем применения ручной сварки и получить значительный технико-экономический эффект [2, 3].

В 1949–1957 гг. для механизации сварки угловых швов, а также стыковых соединений небольшой протяженности разрабатывали и внедряли технологию шланговой механизированной сварки под флюсом электродной проволокой диаметром 1,6 и 2,0 мм полуавтоматами типа ПШ-5 и ПШ-54, созданными ИЭС им. Е. О. Патона.

С целью применения механизированной сварки под флюсом стыковых и угловых соединений при изготовлении секций с криволинейными обводами были разработаны специальные поворотные «постели»-кантователи для подкантовки секций и создания условий сварки в нижнем положении. Впоследствии это направление механизации сварки

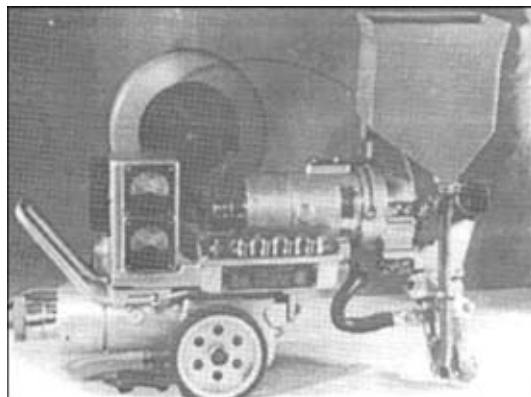


Рис. 2. Автомат АСУ-138 для сварки под флюсом наклонным электродом тавровых соединений судовых конструкций

дальнейшего развития не получило из-за громоздкости кантователей и большой сложности работ. Весьма эффективным путем механизации сварки угловых швов (соединение судового набора с перекрытиями) оказался разработанный в 1949–1950 гг. способ раздельной сборки и сварки судового набора, который позволил применить для этих целей автоматическую сварку под флюсом. Для этого в ЦНИИТС была разработана технология автоматической сварки под флюсом угловых швов наклонным электродом и создан специализированный автомат АСУ-138 (рис. 2).

В 1948–1951 гг. были разработаны основные положения автоматической и механизированной сварки стыковых и угловых швов судовых конструкций.

Дальнейшее (после 1951 г.) развитие сварки под флюсом шло по пути совершенствования технологии сварки, сварочного оборудования, сварочных материалов, методов и средств контроля за качеством сварки, улучшения санитарно-гигиенических условий при выполнении сварочных работ и т. п.

С целью более широкого внедрения механизированной сварки под флюсом был установлен порядок, при котором конструкторские бюро были обязаны уже на стадии технического проекта судна предусматривать максимально возможный объем сварки под флюсом, а ЦНИИТС изучал технические проекты и давал соответствующие заключения. Для определения объемов механизированной сварки ЦНИИТС в 1949–1951 гг. разработана методика расчета, согласно которой объем применения механизированной сварки (или уровень механизации сварочных работ) определялся как отношение площади продольного сечения сварных швов, полученных механизированными способами сварки, к суммарной площади продольного сечения швов, выполненных всеми способами сварки [2].

В 1961–1962 гг. эта методика была заменена методикой ИЭС им. Е. О. Патона, согласно которой уровень механизации сварочных работ определялся как отношение приведенной трудоемкости сварки, выполненной механизированными способами, к суммарной трудоемкости сварки, произведенной всеми способами.

В 1953–1957 гг. осуществлен комплекс исследований по установлению возможности применения различных способов сварки стыковых соединений с увеличенными зазорами (до 4 мм) на флюсовой

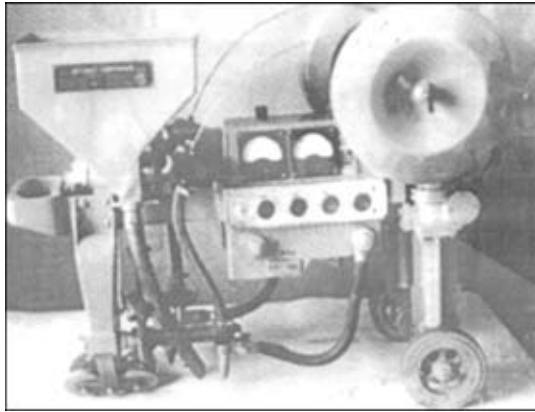


Рис. 3. Автомат ДАСУ-138 для двухдуговой сварки под флюсом тавровых соединений одновременно с двух сторон

подушке и флюсомедной подкладке. Для этих целей на основе разработок ИЭС им. Е. О. Патона на ряде судостроительных предприятий созданы электромагнитные стенды и ЦНИИТС разработана технология двусторонней автоматической сварки на флюсовых подушках стыковых соединений с увеличенными зазорами без скоса кромок при толщине листов 2... 20 мм и со скосом кромок (для листов толщиной 22... 34 мм). Одновременно была разработана технология автоматической односторонней сварки с двусторонним формированием швов.

Однако в связи с недостаточно устойчивым качеством сварных соединений указанные технологии не нашли широкого применения. Для повышения эффективности сварки угловых швов ЦНИИТС разработаны технология и автомат ДАСУ-138 (рис. 3) для одновременной автоматической сварки под флюсом наклонными электродами двух швов (с двух сторон) тавровых соединений (при приварке набора к полотнищам), а также технология механизированной сварки под флюсом угловыми точечными швами тонколистовых конструкций.

В 1958–1959 гг. выполнены научно-исследовательские работы по сварке двухслойных сталей (различных марок судокорпусных сталей, плакированных сталью 10Х18Н9Т), созданы электроды УОНИ-13/НЖ2 и технология ручной и автоматической сварки под флюсом. Наряду с разработкой и совершенствованием процессов сварки значительное внимание уделялось повышению качества сварочных материалов, сварных швов и соединений.

Исследования склонности сварных швов к хрупким разрушениям показали отрицательное влияние насыщения металла шва и зоны термического влияния водородом. Проведены исследования усталостной и динамической прочности, чувствительности к старению и стойкости против коррозии сварных соединений, результатом которых была разработка никелесодержащей проволоки 08-ГН для автоматической сварки под флюсом и электродов для ручной сварки Э-134/45Н и Э-138/50Н, обеспечивающих получение металла шва, стойкого против коррозии и с высокими показателями механических свойств.

В состав флюсов введены ограничения предельных содержаний кремния и марганца, серы и фосфора. Это привело к разделению флюса на два сорта: флюс крупной грануляции для автоматической

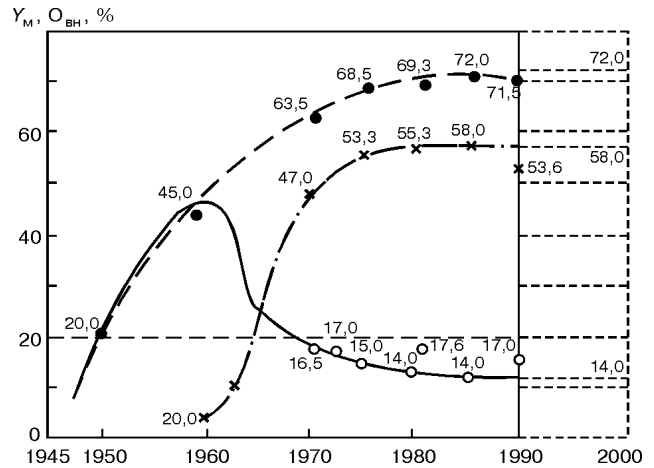


Рис. 4. Динамика изменения объемов внедрения $O_{вн}$ механизированных способов электродуговой сварки плавящимся электродом и уровня механизации сварочных работ Y_m в судостроении: \circ — сварка под флюсом; \bullet — сварка в CO_2 ; \times — уровень механизации

сварки и флюс мелкой грануляции с более жестким ограничением содержания фосфора для механизированной сварки.

В 1949 г. были начаты работы по созданию технологии автоматической вертикальной дуговой (а впоследствии и электрошлаковой) сварки монтажных стыковых швов с использованием сварочного трактора типа ТС-20 с магнитным присосом, созданным в ИЭС им. Е. О. Патона.

Комплекс исследований по отработке техники, технологии сварки и сварочного оборудования, а также по изучению свойств сварных соединений позволил в 1955–1956 гг. начать внедрение автоматической вертикальной сварки с принудительным формированием швов стыковых монтажных соединений корпусов при постройке судов большого водоизмещения типа танкеров, сухогрузов, рефрижераторов и др. [3].

В этот же период были проведены обширные исследования по применению процесса электрошлаковой сварки при изготовлении крупногабаритных изделий массой до 80 т типа штевней, баллеров рулей, судовых валов и др. Электрошлаковая сварка особенно эффективной оказалась при изготовлении крупногабаритных деталей сварнолитых конструкций. Можно считать, что к 1960 г. были завершены исследования способов сварки под флюсом, которые тогда уже получили достаточно широкое внедрение, а технические возможности механизации сварки конструкций за счет способов сварки под флюсом были практически исчерпаны.

На рис. 4 приведена динамика внедрения электродуговых способов сварки плавящимся электродом в судостроении.

Возможность широкого применения в производстве описанных выше технологических процессов подкреплялась созданием необходимой сварочной аппаратуры. В относительно небольшой период в ИЭС им. Е. О. Патона разработано семейство специализированных и универсальных сварочных тракторов и аппаратов (ТС-11, ТС-12, ТС-13, ТС-15, ТС-17, ТС-17М, ИС-17МУ, ДТС-24, ТС-32, А-433, ПШ-5, ПШ-54 и др.).



Значительную роль коллектив этого института и его руководитель академик Е. О. Патон оказали заводам отрасли при внедрении прогрессивных процессов сварки, особенно в период ее освоения на предприятиях юга страны [6, 7].

Ленинградский завод «Электрик», а впоследствии и ВНИИЭСО, создали большую номенклатуру оборудования для дуговой и контактной сварки, которое широко применяется на судостроительных заводах.

К 1970 г. проблемы технологий сварки судостроительных и механизации сварки конструкций из сталей перестали существовать. Созданный комплекс технологических процессов сварки и сварочного оборудования позволял изготавливать любые сварные судовые конструкции.

При строительстве сварных судов в этот период первоочередное значение приобрели вопросы повышения эффективности сварки на различных этапах постройки судов.

Строительство крупнотоннажных судов и применение крупногабаритных стальных листов для корпусов судов, а также разработки в области комплексной механизации изготовления судовых корпусных конструкций выдвинули перед сварочным производством ряд задач, связанных с необходимостью создания новых эффективных технологий сварки, к которым относится прежде всего автоматическая односторонняя сварка с двусторонним формированием швов плоских полотнищ (без их кантовки).

В 1969–1970 гг. созданы технология, автомат «Мир» и стелды для автоматической сварки стыковых соединений толщиной до 32 мм на флюсомедной подкладке, а в 1973 г. разработаны технология и автомат «Бриг» для сварки на скользящем медном ползуне [3].

Для приварки судового набора главного направления к полотнищам в 1974–1976 гг. созданы сборочно-сварочные агрегаты, выполняющие прижатие набора к полотнищам, производящие обратный выгиб в области сварного шва и одновременную приварку набора с двух сторон, а также установку для одновременной автоматической приварки под флюсом четырех ребер жесткости с двух сторон восемь сварочными головками.

С целью повышения производительности сварки при изготовлении плоских секций на комплексно-механизированных линиях была предложена технология многодуговой автоматической сварки под флюсом АН-65 (разработан в ИЭС). Она предусматривает выполнение стыковых соединений полотнищ двумя сварочными головками с двух сторон однопроходными швами на флюсомедной подкладке или флюсовой подушке со скоростью сварки 85... 90 м/ч и тавровых соединений набора с полотнищем двухдуговыми сварочными головками одновременно с двух сторон набора со скоростью сварки до 80 м/ч.

К наиболее значительным разработкам в этой области следует отнести также усовершенствование технологии сварки, сварочных материалов и сварочного оборудования для автоматической односторонней сварки плоских полотнищ без их кантовки.

Совместно с ИЭС им. Е. О. Патона разработан подкладочный флюс АН-80П для варианта сварки на флюсомедной подкладке (1980 г.). В 1981 г. в ЦНИИТС разработана технология автоматической двусторонней сварки стыковых соединений плоских полотнищ без их кантовки, при которой сварка в нижнем положении производится автоматическим способом под флюсом, а подварка шва с другой стороны в потолочном положении выполняется автоматической сваркой тонкой проволокой в CO_2 .

Существенным недостатком технологий односторонней автоматической сварки под флюсом с двусторонним формированием швов является получение сварных швов с обеих сторон с большими колебаниями по ширине и высоте выпуклостей. В значительной степени это связано с подгоночными работами при сборке конструкций.

При выполнении подгоночных работ стремятся обеспечить такой зазор в соединении, при котором исключается возможность образования прожога или непровара при сварке, и не обращают должного внимания на получаемые при этом размеры конструктивных элементов разделки кромок под сварку. В результате (площади поперечного сечения) и объемы разделки кромок, подлежащие заполнению при сварке, сильно отличаются на различных участках соединения, что в сочетании с колебаниями режима сварки приводит к существенно отличающимся геометрическим размерам сварных швов, зачастую выходящих за пределы допуска.

В ЦНИИТС выполнено исследование по установлению допустимых отклонений зазора и ширины разделки кромок, при которых возможно обеспечение заданных нормативными документами размеров сварных швов. Была установлена целесообразность разработки и применения автоматического управления параметрами режима сварки для получения сварных швов необходимых размеров [8].

Отклонение в процессе сварки от заданных значений сварочного тока, напряжения дуги и скорости сварки в большую или меньшую сторону, а также колебания размеров зазоров, углов разделки кромок, притуплений и др. в соединении под сварку приводит к тому, что, с одной стороны, сварное соединение для заполнения фактической разделки кромок нуждается в увеличении или уменьшении объема наплавленного металла, а с другой, — фактический режим сварки будет обеспечивать больший или меньший объем направляемого металла. В результате этого создаются условия, при которых после сварки размеры выпуклости сварных швов получаются с недопустимыми отклонениями от заданных значений.

Следовательно, основным требованием, которому должна удовлетворять программно-управляемая технология сварки, является обеспечение в процессе сварки переменного (необходимого) объема наплавленного металла в различных сечениях соединения по длине с таким расчетом, чтобы размеры выпуклости сварного шва (или катета шва) не выходили за пределы значений, установленных нормативными документами, несмотря на возможные колебания параметров режимов сварки и конструктивных элементов соединений под сварку.

Таким образом, объем наплавленного металла является главным управляемым параметром программируемой технологии автоматической сварки, непосредственно влияющим на качество сварного шва.

Из изложенного следует, что для получения сварных швов требуемого качества следует применять технологию электродуговой сварки плавящимся электродом и сварочное оборудование с числовым программным управлением, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

автоматический выбор сварочного тока, напряжения на дуге и скорости сварки в зависимости от толщины металла и вида соединения согласно действующим нормативным документам;

автоматическое поддержание в ходе сварки режима процесса, установленного в соответствии с нормативными документами, и его корректировка при колебаниях напряжения питающей сети, размеров конструктивных элементов подготовки кромок в соединении и др.;

автоматическое направление сварочной дуги по заданной траектории с необходимой точностью;

автоматическое включение перед началом сварки и выключение после ее окончания подачи сварочного флюса или защитного газа в зону сварки и уборки флюса в процессе сварки.

Технологии электродуговой сварки плавящимся электродом, удовлетворяющие указанным требованиям, следует именовать программно-управляемыми или автоматическими с числовым программным управлением (рис. 5).

Для отработки такой технологии создан макет автомата с числовым программным управлением типа «Мир-ЗП» и разработан процесс односторонней сварки с двусторонним формированием швов на флюсомедной подкладке плоских полотнищ с толщиной металла до 20 мм и длиной 10 м.

Изготовление полотнищ предусматривается на соответствующих позициях поточной линии. Сварка соединений толщиной до 1,6 мм производится одной дугой, а соединений большей толщины — одновременно двумя дугами.

Сварку выполняют постоянным током от источников питания двух типов ВДУ-202 или ВДУ-1201 на токах 300...1200 А при напряжении на дуге 28...46 В электродной проволокой диаметром 2...5 мм под флюсом ОСЦ-45 или АН-348.

Сварочный аппарат (передвигаемый по порталу) относится к подвесному типу с двумя последовательно расположенными головками с системой числового программного управления и системой слежения за направлением движения сварочных дуг по стыку. Первая сварочная головка по направлению движения предназначена для сварки одной проволокой, а вторая — для сварки расцепленным электродом.

Программное обеспечение УЧПУ позволяет автомату выполнять работы в режимах автоматическом, механизированном (ручном), корректировки и справки.

Оценку системы программного управления производили путем сравнения качества формирования сварных швов при включенной или при отключен-

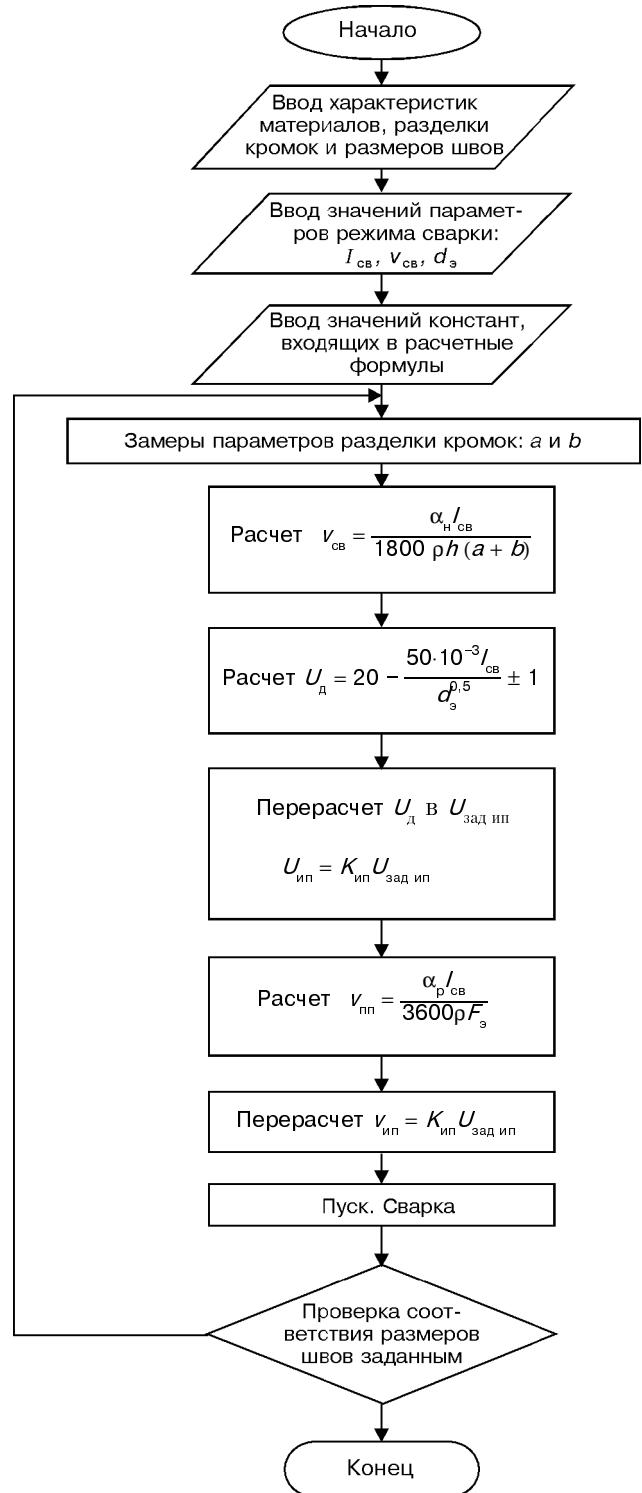


Рис. 5. Блок-схема алгоритма автоматической сварки плавящимся электродом под флюсом с числовым программным управлением

ной системе автоматического управления процессом сварки.

Статистическая обработка результатов экспериментов при сварке соединений с толщиной металла 12 мм показала, что геометрические параметры сварных швов, выполненных с включенной и отключенной автоматической системой управления, находятся в пределах допусков, т. е. не требовалась корректировка основных параметров режима сварки, а за счет стабилизации процесса при програм-



многочисленном управлении получены более гладкие валики как с лицевой, так и с обратной стороны, более плавный переход от шва к основному металлу, меньшие колебания размеров ширины и высоты выпуклости шва.

При двухдуговой сварке соединений с толщиной металла 20 мм без автоматического управления процессом сварки швы характеризуются большими колебаниями размеров ширины и высоты выпуклости, швов особенно с обратной стороны соединения.

На некоторых швах зафиксировано неполное заполнение разделки кромок, наличие подрезов. При включении системы автоматического управления процессом сварки упомянутые дефекты сварных швов отсутствуют.

Проверка указанной технологии сварки в производственных условиях подтвердила полученные ранее результаты.

Выводы

1. Разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона способ электродуговой сварки плавящимся электродом под флюсом оказал значительное влияние на развитие научно-технического прогресса в различных отраслях промышленности.

2. Широкое применение автоматической и механизированной сварки под флюсом в судостроении обеспечило возможность эффективного строительства высококачественных современных судов и ко-

раблей с корпусами из разнообразных марок судокорпусных сталей.

3. В разработке и совершенствовании технологии сварки под флюсом судокорпусных сталей и в создании сварочного оборудования наряду с ЦНИИТС большое творческое участие принимали ИЭС им. Е. О. Патона, ЦНИИТМАШ, завод «Электрик» и др.

1. *Бельчук Г. А.* К истории развития электросварки в отечественном судостроении // Труды ЛКИ. — 1951. — Вып. 9. — С. 15–23.
2. *Развитие* сварки в судостроении / В. С. Головченко, М. Р. Шраерман, В. Р. Абрамович и др. // Судостроение. Технология судостроения. — 1964. — № 5. — С. 40–43.
3. *Сварка* в судостроении / В. С. Головченко, А. А. Казимиров, В. Д. Мацкевич и др. // Сварка в СССР. — М.: Наука, 1981. — С. 140–153.
4. *Володин В. П.* Постройка первого электросварного катера на Дальзаводе в г. Владивостоке // Электросварка в авто-, авиа- и судостроении: Сб. тр. — М.: Гостехиздат, 1931. — С. 57–60.
5. *Муценко Д. А.* Электросварка в речном судостроении во 2-ю пятилетку // Морское судостроение. — 1933. — № 6. — С. 18–21.
6. *Патон Е. О.* Автоматическая сварка в судостроении. — М.: Оборонгиз, 1944. — С. 13–18.
7. *Казимиров А. А.* Автоматическая сварка в речном судостроении // Сборник, посвященный 80-летию Е. О. Патона. — Киев: АН УССР, 1951. — С. 73–76.
8. *Горбач В. Д., Головченко В. С., Стеганцев В. П.* Автоматическое управление режимом сварки под флюсом стальных полотнощип // Вестник технологии судостроения. — 1999. — № 5. — С. 11–15.

Results of development and implementation of technologies of submerged arc welding of steels and structures used for the ship hulls are presented. These technologies made it feasible to build modern ships of the high quality and at high productivity.

Поступила в редакцию 16.06.2000