

На правах рукописи

621.791:004.942

ШОЛОХОВ Михаил Александрович

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ МНОГОПРОХОДНОЙ
СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ПО УЗКОМУ
ЗАЗОРУ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 2016 г.

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург

Официальные оппоненты: доктор технических наук (05.02.10)
ДОРОНИН Юрий Викторович,
ООО «АЦГХ», начальник лаборатории сварки

доктор технических наук (05.02.10), профессор
ДРАГУНОВ Виктор Карпович
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
заведующий кафедрой

доктор технических наук (05.02.10), профессор
ЦАРЬКОВ Андрей Васильевич
Калужский филиал ФГБОУ ВО «МГТУ им.
Н.Э. Баумана», директор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «**Донской государственный
технический университет**»

Защита диссертации состоится 20 октября 2016 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим выслать на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент



А.В. Коновалов

Актуальность работы. Военной доктриной Российской Федерации предусматривается дальнейшее повышение эффективности функционирования системы эксплуатации и ремонта вооружения, военной и специальной техники. На настоящий момент актуальной задачей является создание современной специальной техники нового поколения, требования к техническим характеристикам и эксплуатационной надежности которой определяют применение специальных высокопрочных сталей. При изготовлении корпусных конструкций, обеспечивающих защищенность, огневую мощь и подвижность такой техники исключительное внимание уделяется сварке, занимающей до 50 % от всего объема работ.

Развитие методов сварки корпусных конструкций из высокопрочной стали протекало с последовательной заменой ручной сварки штучными электродами на механизированную сварку под флюсом, а впоследствии более маневренной автоматической и механизированной сваркой в защитных газах. Вместе с тем к настоящему времени подобные технологии сварки достигли своей максимальной производительности, поэтому их дальнейшее перспективное совершенствование может быть основано на расширении использования одно- и многодуговой сварки по узкому зазору. Естественно, подобные усовершенствования не должны привести к ухудшению качества сварных соединений. Однако применение подобных инноваций сдерживается отсутствием достаточных данных об условиях, при которых обеспечивается приемлемое качество и минимизируется вероятность возникновения дефектов сварных соединений.

В этой связи, для решения проблемы повышения производительности сварочных работ и обеспечения стабильно высокого качества соединений необходимо дальнейшее развитие теории формирования сварных соединений при многодуговой многопроходной сварке в защитных газах по узкому зазору, которая позволит сформулировать технические требования к производственным процессам и необходимому сварочному оборудованию.

Цель работы: Повышение производительности сварочных работ и обеспечение стабильно высокого качества сварных соединений корпусных конструкций специальной техники из высокопрочных сталей на основе моделирования процессов формирования сварных соединений при одно- и многодуговой многопроходной сварке плавящимся электродом по узкому зазору.

В соответствии с поставленной целью были определены **основные задачи работы:**

1. Выполнить анализ существующих способов обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений при сварке корпусных конструкций специальной техники.

2. Разработать обобщенную физико-математическую модель формирования сварных соединений при многопроходной сварке по узкому зазору и доказать ее адекватность.

3. Исследовать влияние параметров многопроходной одно- и

двухдуговой сварки по узкому зазору корпусных конструкций на качество формирования соединения.

4. Исследовать закономерности возникновения дефектов при сварке по узкому зазору и разработать методы снижения вероятности их возникновения при выполнении сварочных работ.

5. Сформулировать технические требования к производственным процессам и сварочному оборудованию для обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений при двухдуговой сварке по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники.

6. Реализовать предложенную технологию многопроходной сварки по узкому зазору при изготовлении корпусных конструкций из высокопрочных сталей в производственных условиях.

Методы исследований и достоверность полученных результатов.

В работе использовалась совокупность теоретических, расчетных и экспериментальных методов исследований.

При анализе условий формирования швов и оптимизации режимов сварки использовались методы компьютерного моделирования. Теоретический анализ условий обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений выполнен на основе фундаментальных физико-математических закономерностей, которые являются основой для проведения вычислительного эксперимента, позволяющего по физико-математическим связям составить представление об объекте исследований.

Для фиксации параметров процесса сварки использовали многоканальный регистратор «AWR-725».

Структуру сталей исследовали методами растровой микроскопии на электронном микроскопе Quanta-200 (FEI Company, США) с системой Regasus, использующей методы дифракции обратно отраженных электронов (EBSD) и энергодисперсионный спектрометр (EDS).

Измерения микротвердости швов производили на приборе ПМТ-3.

Достоверность результатов работы подтверждается соответствующими значениями метрологических характеристик, полученных при статистической обработке экспериментальных данных, хорошем совпадении теоретических и опытных значений геометрических параметров сварных соединений, их структур и свойств, практической реализацией результатов.

Научная новизна.

1. Разработаны элементы теории формирования сварных соединений при одно- и двухдуговой многопроходной сварке плавящимся электродом по узкому зазору.

2. Установлено, что особенностью сварки в глубокой зауженной разделке является потеря устойчивости горения дуги вследствие сильного нагрева вылета электрода.

3. Определено влияние формы разделки кромок и положения электрода на распределение тепловой мощности дуги по ширине разделки.

4. Определено, что качественное формирование шва в зауженной

разделке обеспечивается, если высота наплавленного слоя не превышает 0,3 - 0,5 ширины разделки.

5. Установлено, что рациональным по расходу энергии и управляемости процессом двухдуговой сварки является процесс, при котором минимальное расстояние между дугами соответствует разделению общей сварочной ванны на две. Это обеспечивает возможность независимого регулирования глубины проплавления предшествующего слоя током первой дуги, а формы поверхности наплаваемого валика - током и напряжением второй дуги.

6. Показано, что оптимальным расстоянием между дугами, при котором ударная вязкость достигает наибольших значений, является расстояние 100 – 200 мм, обеспечивающее достаточное время пребывания ЗТВ в диапазоне температур полиморфного превращения (850 – 500 °С).

Практическая ценность. Проведенный комплекс исследований позволил создать технологию двухдуговой автоматической и однодуговой механизированной сварки по узкому зазору, которая была использована при производстве корпусов из высокопрочных среднелегированных сталей.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены: на Всероссийской научно-технической конференции «Сварка в машиностроении и металлургии» (Екатеринбург, 2005); Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: НМТ - 2012» (Москва, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Сварка и диагностика» (Екатеринбург, 2012); XIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (СПб., 2012); Twelfth Russian-Israeli Bi-National Workshop «The optimization of the composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials» (Jerusalem, 2013); Международной научно-технической конференции «Сварка и контроль - 2013» (Пермь, 2013); Международной конференции «Сварка и родственные технологии - настоящее и будущее» (Киев, 2013); XIX Международной научно-практической конференции «Высокие технологии в индустрии» (СПб., 2015); XV Международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке» (Москва, 2015); II Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники» (Самара, 2015); IV Международной научно-практической конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов - 2015» (Тула, 2015); семинаре кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2015).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 38 печатных работ, из них 29 работ в журналах, рекомендованных ВАК, издана монография, получено четыре патента РФ на изобретение и полезные модели.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и 4 приложений. Диссертация написана на 391 стр., и содержит 180 рисунков, 46 таблиц. Список литературы состоит из 310 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 рассмотрены проблемы обеспечения требуемого качества сварных соединений при сварке корпусных конструкций специальной техники. Значимый вклад в исследование процессов сварки деталей и узлов специальной техники из высокопрочной стали внесли разработки ИЭС им. Е.О. Патона, в содружестве с ведущими научными организациями и предприятиями. Научные основы сварки высокопрочных сталей создавались Е.О. Патоном, Б.Е. Патоном, А.М. Макарой, Э.Л. Макаровым, Б.С. Касаткиным и др. Показаны этапы совершенствования процессов сварки корпусных конструкций, в которых используются как стыковые соединения, так и соединения под острыми и тупыми углами. Короткие стыковые и соединения под острыми углами, а также труднодоступные соединения сваривают однодуговой механизированной сваркой, более протяженные - автоматической сваркой.

Эффективным путем дальнейшего повышения производительности сварки является применение при сварке корпусных конструкций разделок особой, зауженной формы, с общим углом раскрытия $8-12^{\circ}$. Другой возможностью повышения производительности является дальнейшее расширение областей применения многодуговых процессов. Для промышленного применения таких прогрессивных технологий сварки и решения проблем обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений необходимо развитие теории формирования сварных соединений при многопроходной многодуговой сварке по узкому зазору.

К настоящему времени накоплен опыт по разработке методик анализа и моделей процессов сварки плавлением (В.А. Судник, Э.Л. Макаров, В.А. Ерофеев, В.И. Махненко, С.И. Полосков, А.В. Коновалов, А.С. Куркин, К. Yoshiyama, Т. Ueyama и др.), опираясь на который возможно дальнейшее развитие научных и технологических основ многопроходной сварки по узкому зазору конструктивных элементов и узлов специальной техники.

В главе 2 описана обобщенная физико-математическая модель процесса многодуговой сварки по узкому зазору, которая учитывает формирование шва, прочностных характеристик, напряженного состояния сварного соединения при многопроходной сварке по узкому зазору рис. 1. Для оценки механических свойств металла шва и напряженного состояния сварного соединения применены известные из анализа литературных

источников модели.

Модель формирования многопроходного шва включает подмодель формирования отдельных валиков, условно разделённую на подмодели горения дуги и формирования сварочной ванны.

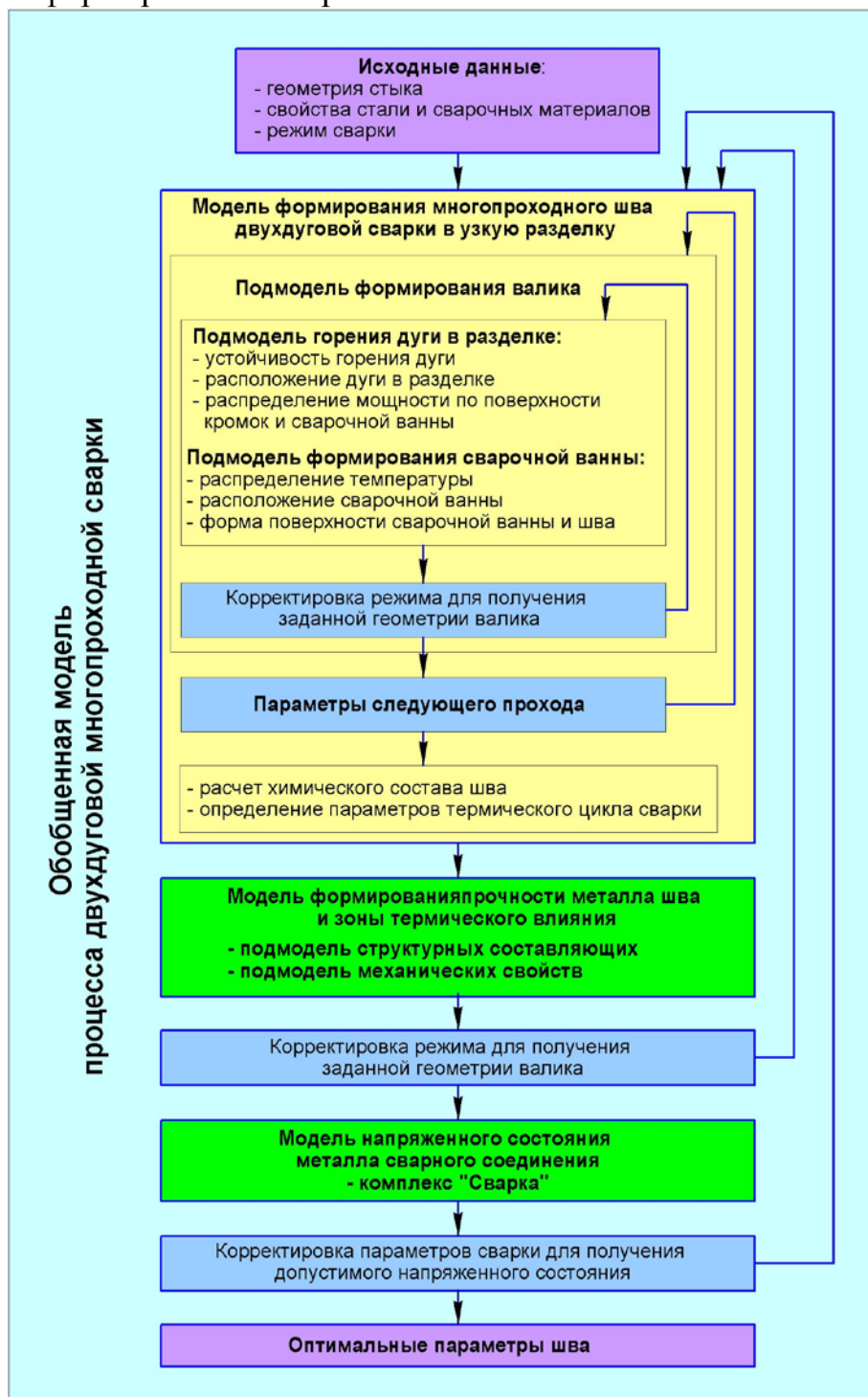


Рис. 1. Последовательность определения параметров режима двухдуговой сварки по узкому зазору

Подмодель горения дуги определяет распределение мощности теплового потока дуги по криволинейной поверхности стыка и сварочной ванны в зауженной разделке кромок.

Новым элементом подмодели является определение длины L_{arc} дуги, как среднего расстояния от торца электродной проволоки Z_f до поверхности металла $Z_T(x,y)$ в пределах круга радиусом, равным радиусу столба дуги R_{arc} :

$$L_{arc} = \frac{2}{r_{arc}^2} \int_0^{r_{arc}} \sqrt{(Z_T(r) - Z_f(r))^2 + r^2} r dr$$

Электрическая цепь питания сварочной дуги включает источник тока, индуктивность и активное сопротивление R_w источника, а также сопротивление вылета проволоки, зависящее от температуры его нагрева, и самой дуги. Дуга рассматривается как три составляющих мощности источника теплоты: тепловыделение в катодном пятне, столбе и на электроде (анодном пятне и вылете) с учётом значений падения напряжения в анодной U_a , катодной U_k областях и градиента потенциала в столбе дуги E . Решение известных уравнений, описывающих электрические процессы в зависимости от длины дуги, позволило оценить устойчивость горения дуги в разделке кромок, расположения дуги в разделке и распределения тепловой мощности дуги по поверхности металла, необходимых для прогнозирования состава и структуры наплавленного металла и металла зоны термического влияния.

Сравнение экспериментальных данных и результатов решения системы уравнений, описывающих влияние электрических процессов в дуге на изменение скорости плавления электродной проволоки, которые воспроизводят динамические процессы при возбуждении дуги после начального короткого замыкания, позволяют сделать вывод об их адекватности. В дальнейшем результаты решения уравнений положены в основу оценки устойчивости горения дуги в заууженной разделке (рис.2).

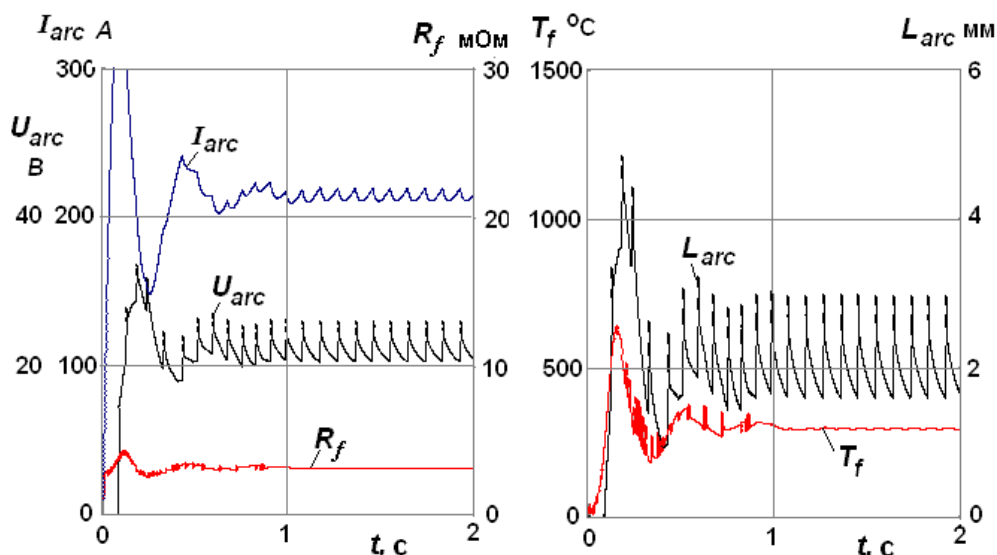


Рис. 2. Результат моделирования процесса возбуждения дуги в CO_2 проволокой диаметром $d_f=1.2$ мм при длине вылета $L_f=15$ мм. U_{arc} , L_{arc} , I_{arc} – напряжение, длина и ток дуги, R_f , T_f – электрическое сопротивление и температура нагрева вылета

Распределение теплового потока в катодном пятне дуги определяли при допущении, что плотность тока j в дуге убывает по мере удаления от торца электродной проволоки:

$$j = k_j \exp\left(-\frac{1}{R_{arc}^2} \left((Z_T(x, y) - Z_f)^2 + x^2 + y^2 \right)\right),$$

где R_{arc} – радиус дуги по каналовой модели Лескова, Z_f – координата конца электрода, $Z_T(x, y)$ – координаты поверхности металла кромок, k_j – коэффициент, значение которого определяется итерационно для получения заданного тока дуги I_{arc} :

$$\int_{Z_r} j dZ_T \xrightarrow{k_j = \text{var}} I_{arc}$$

Распределение мощности теплового потока в катодном пятне определяли по уравнению $q_k = jU_k$, а создаваемое излучением столба дуги $P_r = I_{arc} E L_{arc}$ – по соотношению:

$$q_r = \frac{P_r}{4\pi r^2} \cos \varphi,$$

где $r^2 = x^2 + y^2 + (Z_f - Z(x, y))^2$, φ – угол падения излучения на поверхность.

Распределение мощности соответствует формированию наплавляемого слоя при допущении, что электродный металл мгновенно переносится в этот слой, то есть капля, переместившаяся в сварочную ванну, мгновенно выдавливается из-под дуги ее электромагнитным давлением:

$$q_f(x, y) = \frac{P_f v_x}{\pi r_f^2 v_f} \frac{dZ(x, y)}{dx}$$

где v_x , v_f , r_f – скорость сварки, скорость подачи проволоки и радиус электродной проволоки.

Принятая модель распределения теплового потока дуги на плоской поверхности металла близка к общепринятому нормальному закону. Расчет по модели учитывает характерное изменение распределения теплового потока в разделке кромок, рис. 3.

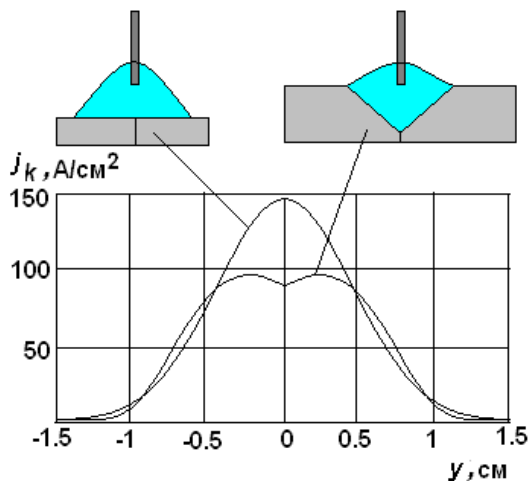


Рис. 3. Результаты расчета плотности тока в катодном пятне дуги на плоской поверхности металла и в V-образной разделке при токе 200 А и длине дуги 6 мм

Основой *подмодели формирования сварочной ванны* является уравнение теплопроводности, граничные условия которого учитывают фактическую геометрию стыка, изменяющуюся по мере его заполнения и плавления кромок дугами в стыке. Геометрия стыка $Z(x,y)$ при плавлении кромок и переносе электродного металла определяется решением уравнения равновесия давлений на поверхности сварочной ванны. При двухдуговой сварке при образовании общей ванны необходимо учитывать гидродинамическое давление течения расплава в ванне, создаваемой первой дугой:

$$p_v = \rho \left(v_x \frac{\partial}{\partial x} Z(x, y) \right)^2$$

Особенностью многопроходной сварки в узкую разделку является пространственное расположение границе плавления, соответствующей изотерме температуры плавления T_L на поверхности кромок. Это вынуждает описывать её неявной функцией $Z_T(x,y)$, определяемой по решению уравнения теплопроводности $T(x,y,z)$ в соответствии с соотношением:

$$T(x,y,Z_T(x,y)) = T_L$$

Совместное численное решение уравнения равновесия давлений на поверхности сварочной ванны и теплопроводности позволяет определить форму сварочной ванны, рис. 4.

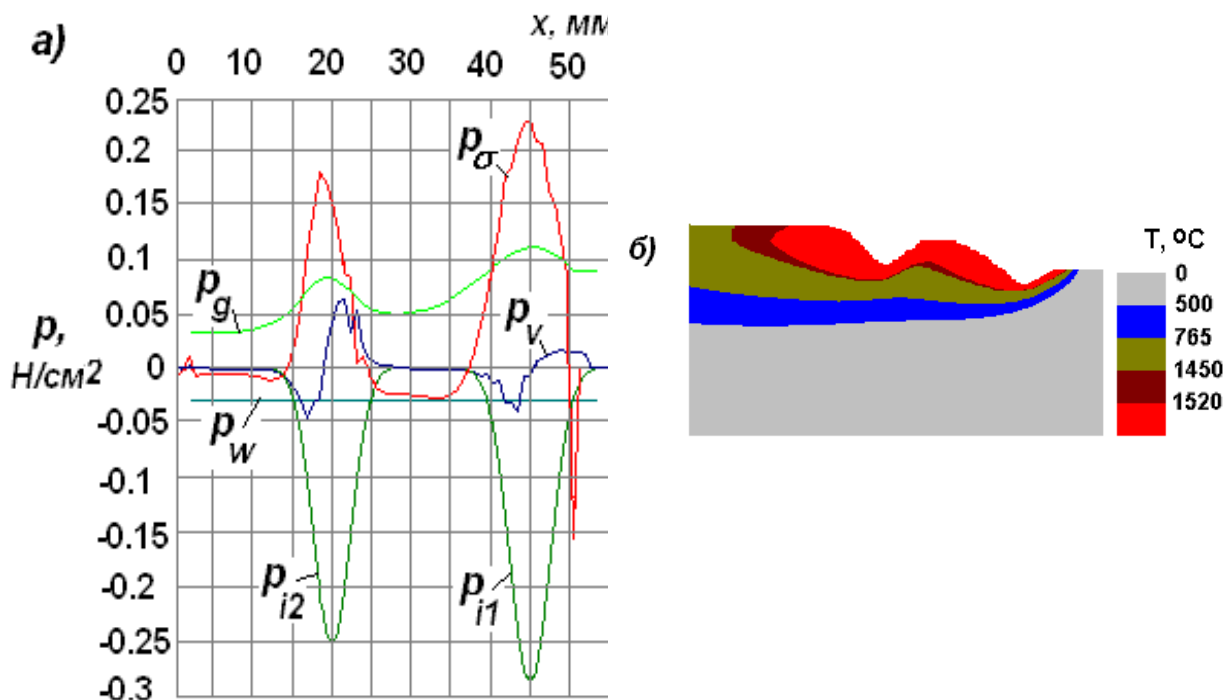


Рис. 4. Распределение составляющих давления (капиллярного p_σ , гравитационного p_g , электродинамического p_i , гидродинамического p_v и внутреннего p_w) на поверхности сварочной ванны (а) и ее продольное сечение в плоскости симметрии (б)

Решение уравнений подмодели формирования валика позволяет воспроизвести профиль каждого последующего валика многопроходного шва, рис. 5.

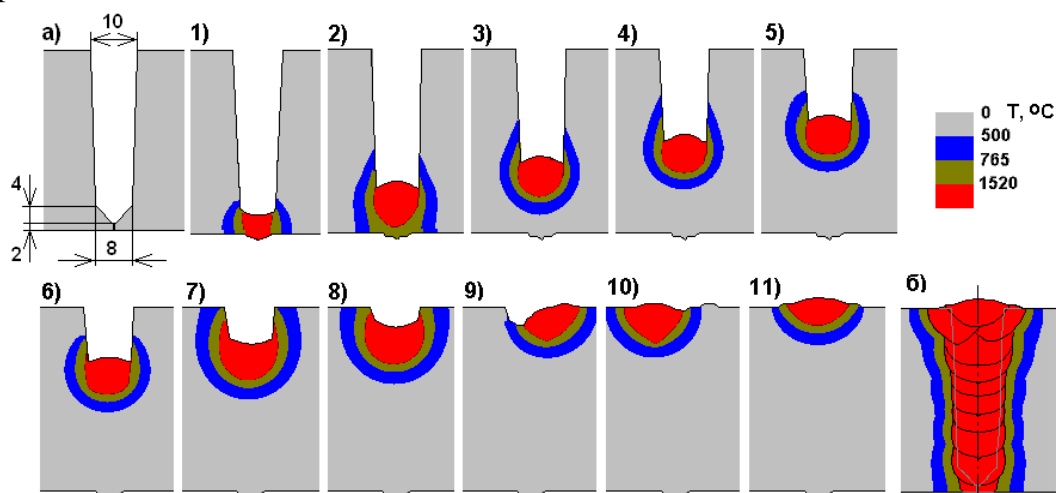


Рис. 5. Результаты последовательного моделирования формирования многопроходного шва при двухдуговой сварке: а) исходная геометрия кромок, 1)...11) профили проходов, б) строение многопроходного шва

Прочность сварного соединения определяется не только геометрией сечения сварного шва, но и свойствами металла шва и ЗТВ. Металл шва образуется в результате перемешивания в сварочной ванне основного и

присадочного металлов и реакций взаимодействия нагретого металла с газами атмосферы и защитной среды, а также с расплавленным шлаком на поверхности металлической ванны.

Содержание легирующих элементов в шве можно с достаточной точностью оценить по долям участия наплавленного электродного металла и металла свариваемых кромок с учетом коэффициентов перехода элементов в сварочную ванну.

Решение уравнения теплопроводности позволяет определить квазистационарное распределение температуры не только в сварочной ванне, но и вокруг нее. По этому распределению определяется расположение изотермических поверхностей для температур начала и конца распада аустенита $T(x_8, y_8, z_8) = 850$ °С и $T(x_5, y_5, z_5) = 500$ °С. В свою очередь по расположению этих поверхностей $x_8(y_8, z_8)$ и $x_5(y_5, z_5)$ определяли длительность пребывания стали в диапазоне температур 850 – 500 °С.

Поэтому очевидным равенством является то, что t_{85} равно:

$$t_{85}(y, z) = \frac{x_8(y_8, z_8) - x_5(y_5, z_5)}{v_w}$$

Следует отметить, что данное уравнение позволяет рассчитывать длительность охлаждения t_{85} для разных точек сечения ванны.

Модель формирования прочностных свойств металла разработана на основе опубликованных работ П. Зайффарта и О.Г. Касаткина, в которых содержание структурных составляющих сталей и их механические свойства определяются по содержанию легирующих элементов и термическому циклу сварки, который рассчитывается в подмодели формирования шва, рис. 6.

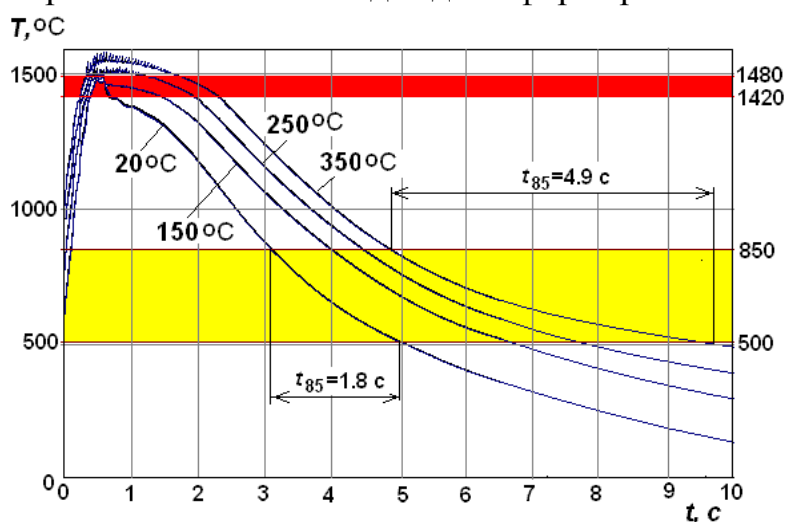


Рис. 6. Определение длительности t_{85} начала и конца фазовых превращений по термическим циклам металла шва при дуговой сварке низколегированной стали при различной температуре подогрева листов толщиной 10 мм

На основе известных данных химический состав металла шва определяли по долям участия наплавленного электродного металла и основного металла с учетом коэффициентов перехода элементов позволяет

рассчитывать доли мартенсита, бейнита, перлита и феррита. В зависимости от соотношения этих составляющих определяли твердость стали, пределы прочности и текучести, относительные удлинение и сужение, ударную вязкость, рис. 7.

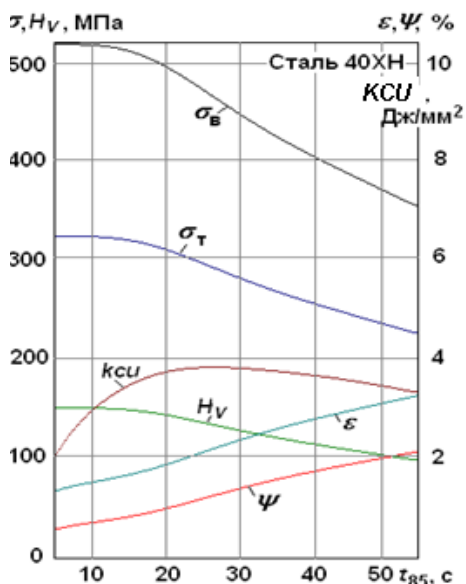


Рис. 7. Результат расчёта механических свойств стали 40ХН при разной длительности t_{85} охлаждения с 850 до 500°С. H_v – твёрдость, σ_B , σ_T – пределы прочности и текучести, ε - относительное удлинение, ψ - поперечное сужение, KCU – ударная вязкость

Возможности модели формирования прочности металла шва и зоны термического влияния, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана и реализованная в программном комплексе «Сварка», позволили использовать ее в качестве инструмента для исследования технологий двухдуговой сварки.

В главе 3 описаны результаты проверки адекватности моделирования, т.е. степени соответствия между результатами вычислений и эксперимента.

Большая часть тестовых опытов для проверки разработанной физико-математической модели формирования валиков была выполнена при сварке однопроходных швов и корневых проходов многопроходных швов, рис. 8.

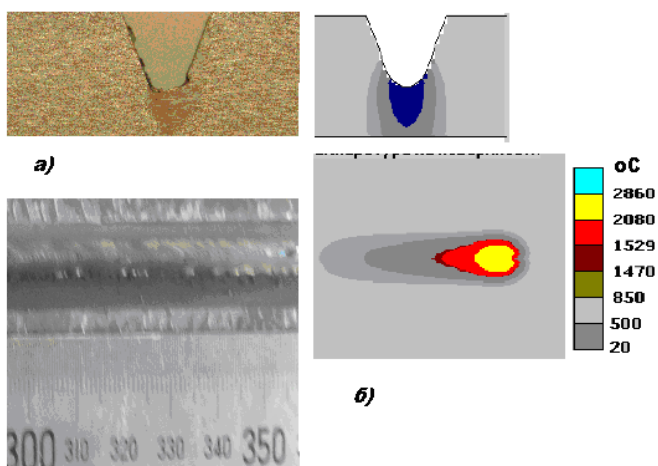


Рис.8. Сравнение экспериментальных (а) и расчетных (б) данных. Соединение: С17, сталь 09Г2С, толщина 16 мм, проволока: Св-08Г2С, диаметр 1,2 мм, скорость подачи 5,1 м/мин; газ CO₂; напряжение источника 26 В; сварочный ток 220 А; скорость сварки 0,6 м/мин

Опыты выполняли при сварке стали 09Г2С толщиной 6 мм без разделки кромок и толщиной 16 мм с V-образной разделкой при токах дуги

120 – 350 А и скорости сварки 0,3 – 0,72 м/мин. Сравнение данных опытов ($Z_{\text{ЭКС}}$, $B_{\text{ЭКС}}$) с результатами моделирования ($Z_{\text{МОД}}$, $B_{\text{МОД}}$) показано на рис. 9.

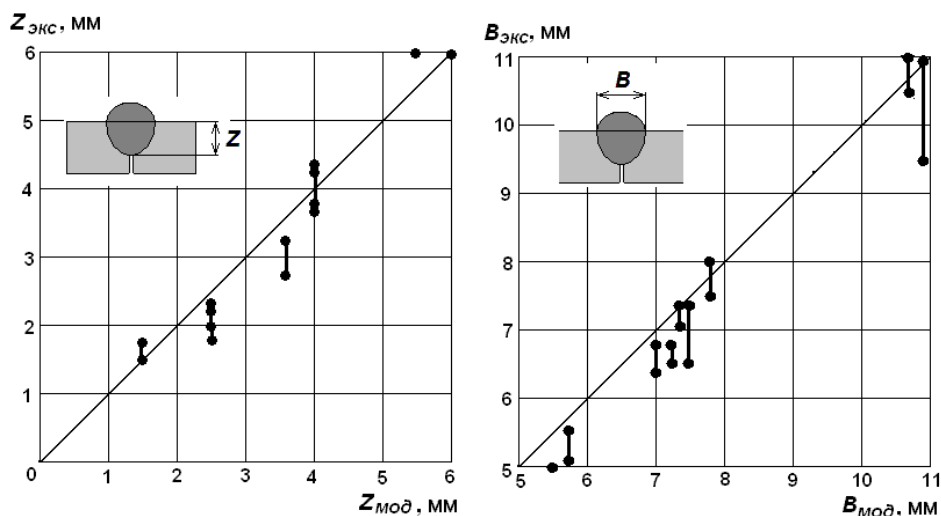


Рис. 9. Функция «моделирование – экспериментальное значение» для глубины проплавления Z и ширины шва B

Погрешность при сравнении расчетов параметров с экспериментальными данными составила: для тока дуги 7 %, для ширины шва 9 %, для глубины проплавления 8 %. Оценка сходимости результатов показала удовлетворительное соответствие экспериментальных и теоретических значений. Проверка адекватности полученных зависимостей по критерию Фишера дала положительные результаты при доверительной вероятности 0,95.

Проверка воспроизводимости процесса сварки двумя дугами выполнялась на пластинах из стали 09Г2С толщиной 22 мм с выполненным скосом кромки 10° и притуплением 2 мм. Сварку образцов выполнили проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в смеси 82 % аргона, 18 % CO_2 при расстоянии между дугами 20 мм, токе первой дуги 245 А, второй - 217 А, скорость подачи электродной проволоки на первой дуге 8,1 м/мин, на второй – 7,1 м/мин, скорость сварки 0,6 м/мин.

Результаты моделирования (рис. 10) демонстрируют особенность формирования сварочной ванны при двухдуговой сварке – формирование волны расплава между дугами, а поверхность предшествующего валика переплавляется преимущественно первой дугой.

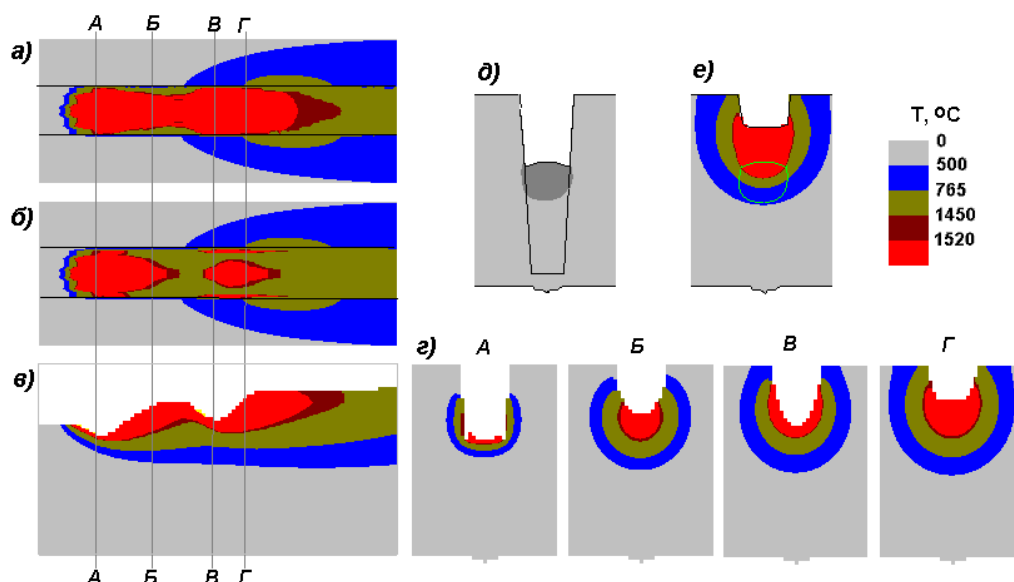


Рис. 10. Результаты компьютерного моделирования формирования сварочной ванны при двухдуговой сварке - распределение температуры и форма поверхности и расположение источников нагрева: а) сверху стыка, б) на предыдущем слое, в) в плоскости симметрии стыка, г) в поперечных сечениях А-А, Б-Б, В-В, Г-Г, д) профиль сечения предыдущего прохода, е) предельное распределение температуры; источники нагрева расположены в сечениях А-А и В-В

Для проверки достоверности результатов моделирования была выполнена сварка листов толщиной 22 мм из стали Ст3 с узкой разделкой кромок, которая имела ширину 6 мм сверху листа и 4 мм снизу. Сварку выполняли в CO_2 проволокой Св-08Г2С. При выполнении опытов измеряли ток дуги I и напряжение U_0 , а также определили толщину наплавленного слоя H , глубину проплавления и высоту выпуклости (вогнутости) G шва. План опытов приведен в табл. 1.

Таблица 1. План и результаты опытных сварок в узкую разделку

№ опыта	Задано					Измерено			
	Y_0/Z_0	v_w , м/мин	L_f , мм	d_f , мм	v_f , м/мин	I , А	U_0 , В	Размеры шва	
								H , мм	G , мм
1	4/17	0,5	5	1,2	7,7	257,0	22,4	3,1	- 1,5
2		0,4	10		11,2	305,1	27,64	7,7	- 3,1
3		0,5	5	1,0	11,2	190,6	24,26	3,2	-1,0
4		0,4	10		7,7	132,8	24,77	2,9	- 1,3

Результаты сварки и моделирования приведены на рис. 11.

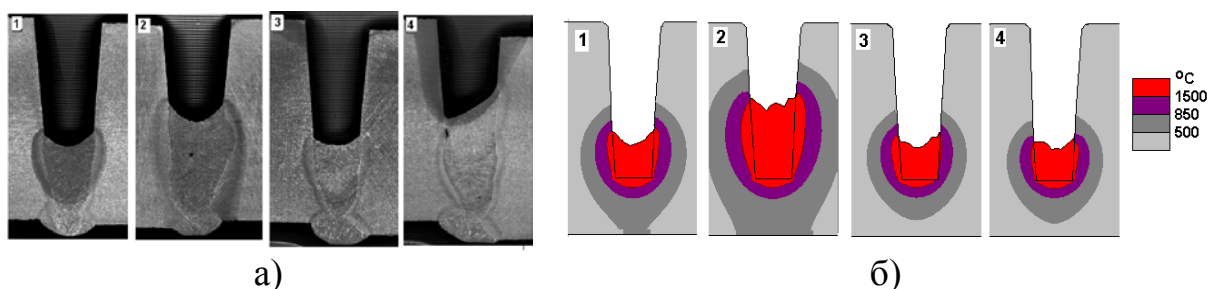


Рис. 11. Сравнение результатов опытных сварок (а) и соответствующие результаты моделирования (б):

Для экспериментальной и расчетной оценки механических свойств металла шва были сварены пластины из стали 20ХГСНМ проволокой ОК Autrod 13.31 диаметром 1,2 мм. Установлено, что расчетные значения предела прочности 920 МПа, предела текучести 772 МПа, ударной вязкости 1,26 МДж/м², относительного удлинения 16,2 %, поперечного сужения 55,3 %, удовлетворительно соответствуют опытным данным, рис. 12.

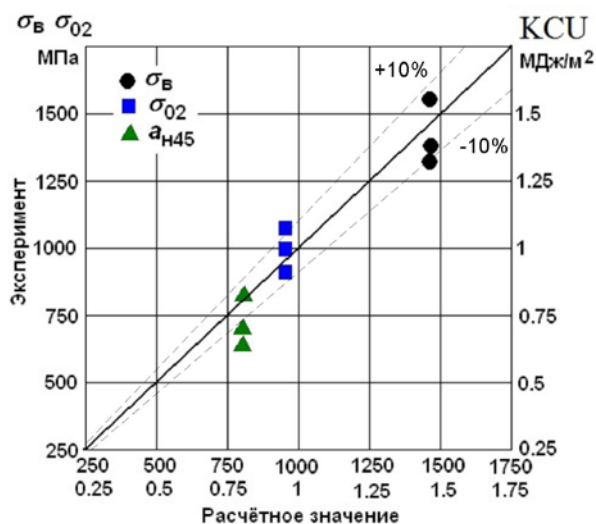


Рис. 12. Сравнение экспериментальных и расчетных значений механических свойств металла шва

Расхождение расчетных и экспериментальных данных в основном не превышает 10 %, что позволяет сделать вывод о пригодности разработанной модели для оценки механических свойств сварных соединений.

В главе 4 выполнено исследование влияния параметров многопроходной сварки высокопрочных сталей по узкому зазору на форму ванны и показатели качества формирования шва. Результаты исследования однодуговой сварки справедливы и для многодуговых сварочных процессов, если они не образуют общей сварочной ванны. Особое внимание было уделено неустойчивому горению дуги в разделке, так как при сварке по узкому зазору дуга перемещается как по донной части разделки, так и на ее боковую поверхность, рис. 13.

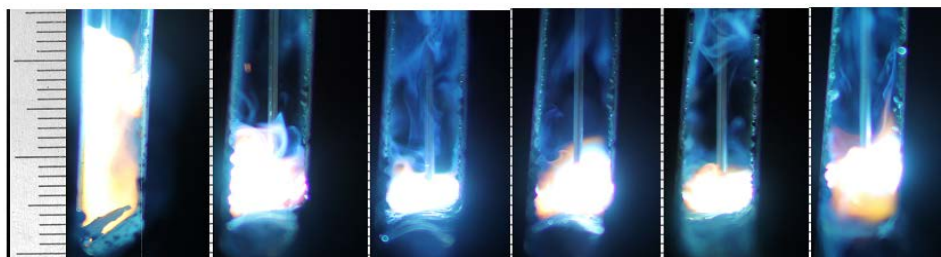


Рис. 13. Характерное перемещение дуги в зауженной разделке: диаметр проволоки 1,2 мм, ток 180-200 А, напряжение 28-30 В. Фото сделаны с периодом 0,3 с

Установлено, что при вылете электрода в диапазоне 10-15 мм при возбуждении дуги наблюдается быстрая стабилизация процесса сварки.

Если температура вылета менее 300 °С, то она не оказывает существенного влияния на процесс стабилизации дуги, определяемый характеристиками источника питания и его индуктивностью.

При большой длине вылета электрода (≥ 30 мм) процесс установления устойчивого горения дуги затягивается по времени, из-за чего возникают значительные автоколебания не только тока I_{arc} , напряжения U_{arc} и длины дуги L_{arc} , но и температуры T_f и электрического сопротивления вылета R_f (рис. 14).

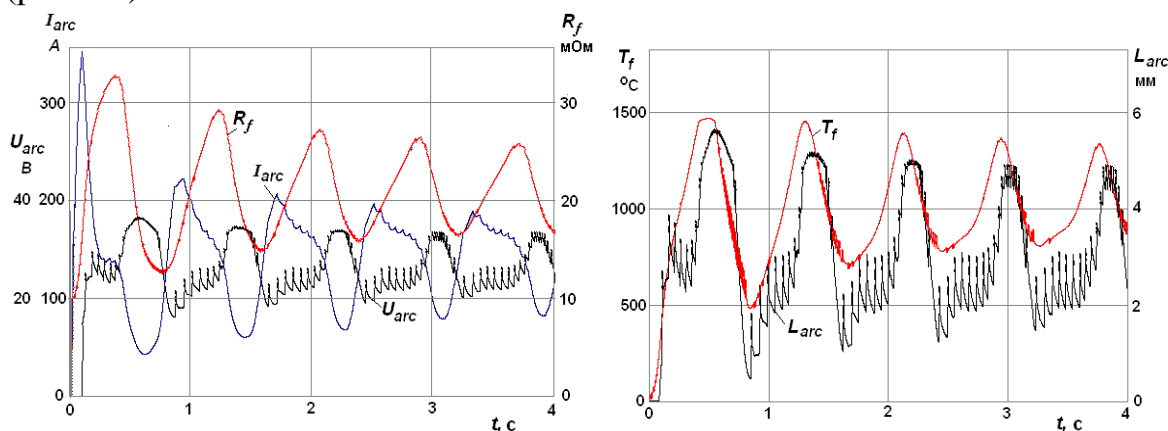


Рис. 14. Результат моделирования процесса возбуждения дуги (а) и температуры капли (б) при сварке в CO_2 проволокой диаметром $d_f=1.2$ мм при длине вылета $L_f=55$ мм. $U_0=55$ В, $v_f=4,8$ м/мин, $R_w=0,08$ Ом, $L_w=10$ мГн

Возникновение автоколебаний объясняется резким возрастанием коэффициента передачи в контуре саморегулирования «источник питания - электрод - дуга» вследствие увеличения температуры нагрева вылета. Факторами, поддерживающими процесс колебаний и снижающими устойчивость горения дуги, являются периодические изменения температуры T_f и сопротивления вылета R_f . Амплитуда колебаний параметров дуги ограничивается условиями перехода дуги с донной части разделки на ее боковые поверхности, то есть ограничена возможной длиной дуги.

Для снижения вероятности возникновения межслойных несплавлений сравнивали варианты сварки второго прохода в зауженной разделке при заданных значениях высоты заполнения разделки. Скорость сварки (0,6 м/мин) и напряжение на дуге (30 В) были постоянными, тогда как скорость подачи электродной проволоки v_f диаметром 2,0 мм изменяли для получения заданной высоты H заполнения разделки. Влияние скорости подачи проволоки и тока дуги на высоту наплавки и на профиль поперечного сечения шва при сварке стыка из стали Ст 3 толщиной 30 мм при ширине разделки 9 мм, проволокой диаметром 2,0 мм представлено на рис. 15.

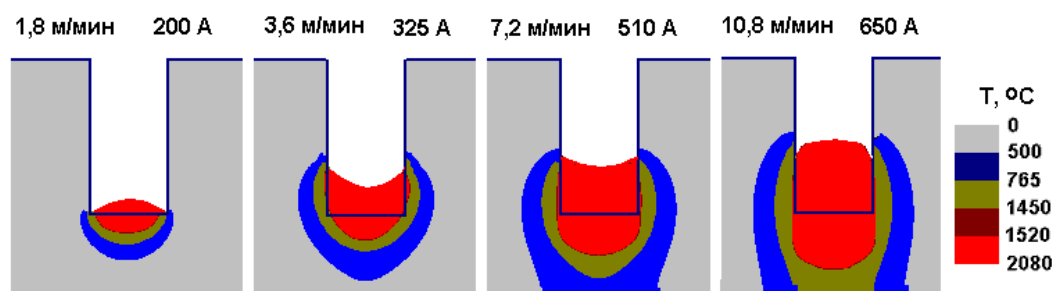


Рис. 15. Предельные значения температуры и форма поперечного сечения шва при разных значениях скорости подачи проволоки и тока дуги

Приведенные данные наглядно показывают, каким образом скорость подачи проволоки влияет на форму наплавленного валика и параметры процесса сварки, рис. 16.

При длинной дуге (> 15 мм) ее излучение хорошо прогревает боковые поверхности разделки и обеспечивает плавление металла на них на значительной высоте над сварочной ванной формируется вогнутая поверхность сварочной ванны. При короткой дуге подогрев стенок разделки излучением существенно уменьшается, что затрудняет плавление металла на них, соответственно сварочная ванна и шов формируются с выпуклой поверхностью, что считается недопустимым. Имеется оптимальное значение параметров сварки, при которых обеспечиваются достаточное проплавление кромок ($g_L > 0$) и формирование вогнутой поверхности шва ($h_z > 0$), что минимизирует вероятность межслойных несплавлений на последующих проходах. Установлено, что для рассмотренного варианта сварки необходимая скорость подачи проволоки лежит в диапазоне 3,6 – 7,2 м/мин.

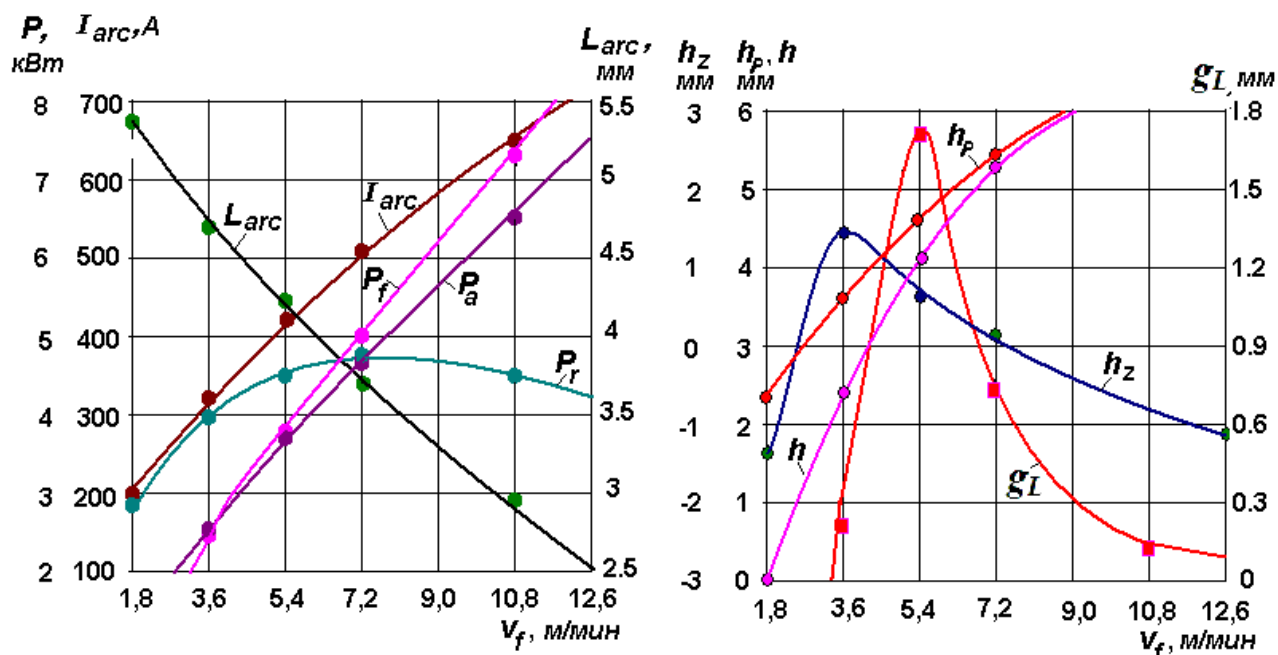


Рис. 16. Зависимость параметров процесса сварки по узкому зазору и формы наплавленного валика от скорости подачи электродной проволоки $\varnothing 2,0$ мм

Моделирование процесса сварки проволоками диаметром 1,2, 1,6 и 2,0 мм при скорости сварки 0,6 м/мин и напряжении на дуге 30 В, показало, что при использовании проволоки диаметром 1,2 мм температура нагрева вылета недопустимо высока (>550 °С), а шов формируется выпуклым с глубоким подрезом.

Полученные данные по влиянию параметров процесса сварки на формообразование шва приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние диаметра электродной проволокой на параметры процесса сварки

Параметр процесса	Диаметр электродной проволоки, мм		
	1,2	1,6	2,0
Скорость подачи электрода v_w , м/мин	15	8,4	5,4
Ток дуги I_{arc} , А	355	400	425
Длина дуги L_{arc} , мм	3,7	4,0	4,2
Температура нагрева вылета T_f , °С	875	525	335
Мощность тепловыделения в активном пятне P_a , Вт	2950	3425	3680
Мощность теплопереноса излучением P_r , Вт	3400	4100	4450
Выпуклость («+» вогнутость) h_z шва, мм	-1,2	1,4	1,6
Глубина сплавления на кромках g_L , мм	0,6	0,9	1,7
Толщина наплавленного слоя, Н, мм	4,8	4,9	4,7
Максимальная глубина проплавления, h_p , мм	3,9	4,3	4,4

Удовлетворительные результаты получены при диаметре проволоки 1,6 и 2,0 мм ($g_L > 0$, $h_z > 0$, $h_p > 0$, $H = H_0$, H_0 – заданная высота наплавки).

Исследовали влияние напряжения и длины дуги на формирование сварочной ванны и шва при скорости сварки 10 мм/с, скорости подачи 90 мм/с электродной проволоки диаметром 2 мм и токе дуги 425 А в разделке шириной 10 мм. Напряжение сварочной дуги изменяли в диапазоне 20...35 В.

Результаты моделирования представлены на рис. 17 и в табл.3.

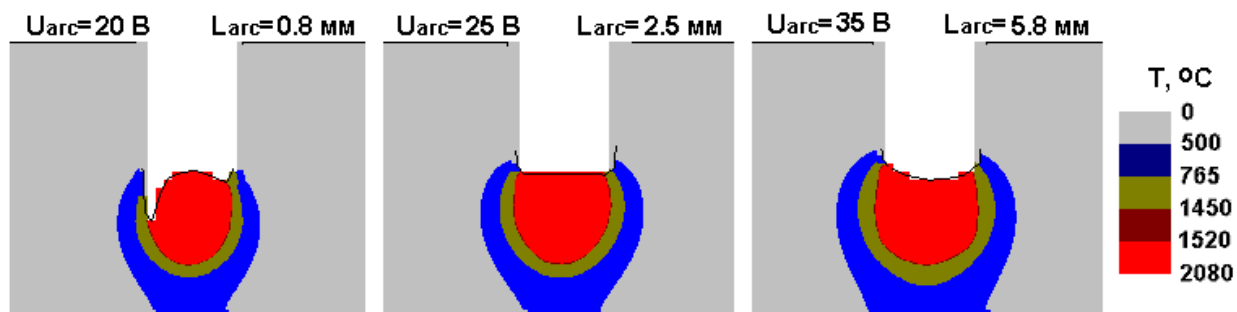


Рис. 17. Влияние напряжения и длины дуги на форму поперечного сечения шва и предельное распределение температуры

Таблица 3. Результаты моделирования процесса сварки при изменении напряжения дуги

Параметр процесса	Напряжение дуги, В		
	20	25	35
Длина дуги L_{arc} , мм	0,8	2,5	5,8
Мощность теплопереноса излучением P_r , Вт	936	2720	6120
Выпуклость (+ вогнутость) h_z шва, мм	- 1,2...- 4,0	- 0,1	+ 0,6
Глубина сплавления на кромках g_L , мм	0,85	0,25	1,56
Толщина наплавленного слоя, H , мм	5,5	5,3	4,6
Максимальная глубина проплава, h_p , мм	4,5	4,4	4,5

Нормальное формирование шва при низком напряжении дуги затруднено из-за недостаточной мощности источника теплоты. Из-за слабого прогрева боковых поверхностей кромок формируется несимметричный шов с большой выпуклостью и глубокими подрезами. При повышении тока и напряжения дуги мощность излучения возрастает, подогрев кромок усиливается, что приводит к нормальному формированию шва.

Технологическими особенностями двухдуговой сварки являются возможности по формированию общей или двух отдельных сварочных ванн.

Формирование общей сварочной ванны под воздействием электродинамического давления двух дуг сопровождается появлением двух кратеров на ее поверхности с характерной волной расплава между ними, а электродный металл поступает в ванну двумя потоками. Для расчета состава принимаем общую ванну шва реактором идеального смешения.

Заполнение разделки при двухдуговой сварке двумя последовательно перемещающимися дугами от двух сварочных источников в отдельные

ванны позволяет независимо регулировать параметры каждой дуги. В соответствии с этим формируется состав каждой сварочной ванны.

Аналогично моделированию процесса однодуговой сварки исследовали влияние параметров режима на геометрические характеристики сварных швов при двухдуговой сварке в разные ванны. Анализ полученных результатов позволил определить эффективные параметры режима заполняющих проходов. Скорость сварки выбрали равной 5 мм/с, диаметр проволоки Св-08Г2С для первой дуги выбрали 2,0 мм, второй – 1,2 мм, скорость подачи электродной проволоки соответственно 60 мм/с и 160 мм/с. Токи дуг при этих параметрах составляли 315 А и 280 А. Напряжение питания дуг выбрано 30 В, что обеспечило длину дуг не более 3 мм.

Большое влияние на качественное формирование шва оказывает расстояние между дугами. При минимальном расстоянии между дугами (сварка одной дугой), рис. 18, б, дуги заглубляются в металл и формируют очень глубокий кратер на поверхности шва, переплавляя предыдущий слой. Увеличение расстояния между дугами уменьшает проплавление и улучшает прогрев боковых поверхностей кромок, что способствует формированию вогнутой поверхности валиков, рис. 18, в, г. При расстоянии между дугами, когда происходит разделение общей сварочной ванны на две, глубина проплавления определяется, в основном, первой дугой, а высота наплавки и форма поверхности шва - второй дугой.

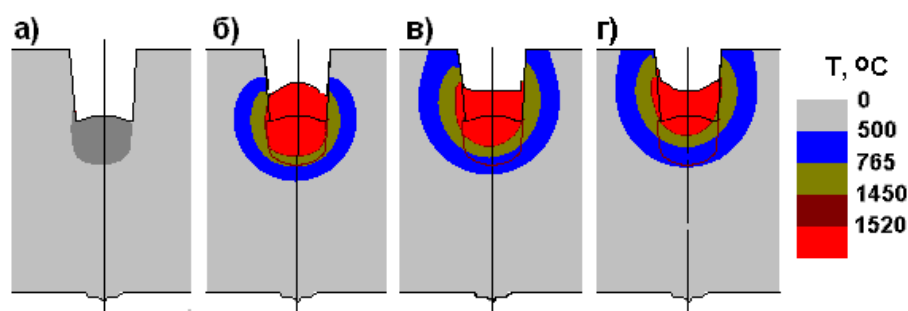


Рис. 18. Влияние расстояния между дугами на предельное распределение температуры и форму поверхности шва: а) профиль валика, полученного при сварке предыдущего прохода, б) сварка одной дугой, в) сварка двумя дугами на расстоянии 20 мм, г) сварка двумя дугами на расстоянии 40 мм

На рис. 19 показано изменение геометрических размеров слоя шва в зауженной разделке кромок от расстояния между дугами.

В качестве критериев формирования выбраны глубина проплавления предыдущего слоя Z , минимальная высота наплавки H и величина вогнутости $+h$ шва или его выпуклости $-h$. При увеличении расстояния между дугами глубина проплавления и высота наплавки убывают, а поверхность валика из выпуклой преобразуется в вогнутую, пока существует общая ванна. При расстоянии между дугами более 20 мм происходит разделение сварочной ванны на две независимые.

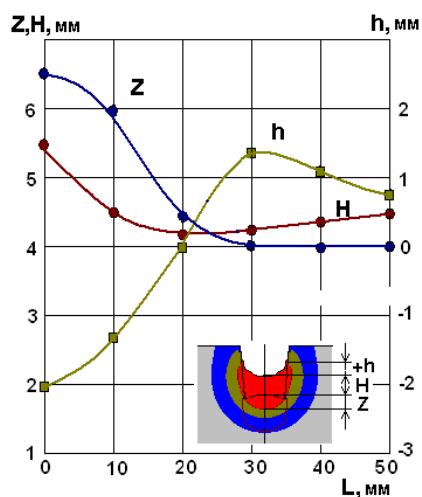


Рис. 19. Влияние расстояния между дугами на размеры валика заполняющего прохода

Для обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений исследовали влияния параметров двухдуговой сварки на механические свойства металла шва. При моделировании формирования шва рассчитывали соотношение доли электродной проволоки в шве S_M/S_f , химический состав металла шва, длительность t_{85} пребывания металла в диапазоне температур 850...500 °С, доли мартенсита М % и бейнита Б % и механические свойства.

Результаты расчета при параметрах сварки, указанных в табл. 4, приведены в табл. 5.

Таблица 4. Параметры сварки заполняющих проходов стали 25ХГСА толщиной 30 мм по узкому зазору

Вариант	Скорость сварки, мм/с	Мощность, Вт		Расстояние между дугами, мм
		Дуга 1	Дуга 2	
1	5	4500	2000	5
2	10	6500	3000	5
3	5	4500	2000	20
4	10	6500	3000	25

Таблица 5. Влияние скорости сварки и расстояния между дугами при двухдуговой сварке стали 25ХГСА проволокой Св-08Г2С на механические свойства шва и зоны термического влияния.

№ вар. (табл. 5)	S_M/S_f		t_{85} , с	М%	Б%	H_v , МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ %	ϕ %	КСУ, МДж/м ²
1	48/52	Шов	4,6	83,7	16,2	400	1236	867	10,3	28,3	0,53
		ЗТВ	5,3	98,5	1,3	485	1590	1590	7,9	18,1	0,58
2	58/42	Шов	3,1	97,6	2,4	434	1357	940	9,1	25,3	0,25
		ЗТВ	3,3	99,9	0,1	488	1600	1064	7,5	17,4	0,33
3	34/66	Шов	4,5	74,0	26,0	370	1120	800	11,0	32,0	0,58
		ЗТВ	4,9	99,1	0,9	486	1594	1060	7,8	17,9	0,53
4	58/42	Шов	3,0	96,6	3,4	426	1320	920	9,4	26,5	0,24
		ЗТВ	3,3	99,9	0,1	488	1600	1064	7,5	17,4	0,32

Полученные результаты показывают, что при сварке стали 25ХГСА

без предварительного подогрева кромок при скоростях сварки выше 5 мм/с швы и ЗТВ имеют преимущественно мартенситную структуру.

Для изучения возможности улучшения механических свойств соединения путем изменения химического состава проволоки было выполнено моделирование процесса сварки с использованием проволок марок Св-08, Св-08ГСМТ.

Установлено, что использование проволоки Св-08ГСМТ дает относительно небольшое увеличение ударной вязкости и предела прочности металла шва.

Результаты расчета свойств металла шва для 3 варианта сварки (табл. 4), приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты анализа влияния марки электродной проволоки на структуру и механические свойства металла шва при двухдуговой сварке стали 25ХГСА со скоростью 5 мм/с

$S_M/S_f = 34/66$		$t_{85},$ с	М%	Б%	П%	Ф%	$H_v,$ МПа	$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_T,$ МПа	$\delta,$ %	$\phi,$ %	$KCU,$ МДж/м ²
Шов	Св-08Г2С	4,5	74,0	26,0	0	0,1	370	1120	800	11,0	32,0	0,58
	Св-08		39,7	54,4	2,7	3,1	304	931	677	14,5	35,2	0,99
	Св-08ГСМТ		67,5	31,9	0,4	0,1	355	1085	779	12,1	32,4	0,78
ЗТВ	25ХГСА	3,1	99,9	0,1	0	0	488	1600	1064	7,4	17,3	0,53

Известно, что предварительный и сопутствующий подогрев при сварке являются технологическими способами регулирования параметров термического цикла. Вместе с тем, при двухдуговой сварке в отдельные ванны первая дуга может выполнять функцию подогрева кромок перед второй дугой, то есть расстояние между дугами существенно влияет на механические свойства. Зависимость ударной вязкости от расстояния между дугами при двухдуговой сварке представлена на рис. 20.

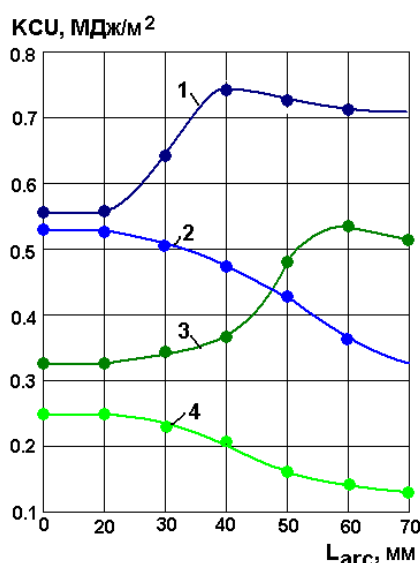


Рис. 20. Зависимость ударной вязкости от расстояния между дугами: 1,2 – при скорости сварки 5 мм/с; 3,4 – при скорости 10 мм/с, 1,3 – металл шва, 2,4 – металл шва

Было установлено, что увеличение расстояния между дугами приводит к увеличению ударной вязкости металла в ЗТВ, но снижает ее в металле шва, а также, что оптимальное расстояние между дугами, соответствующее максимальным значениям ударной вязкости в ЗТВ, совпадает с длиной области пребывания металла в диапазоне температур полиморфного превращения при сварке одной дугой, рис. 21.

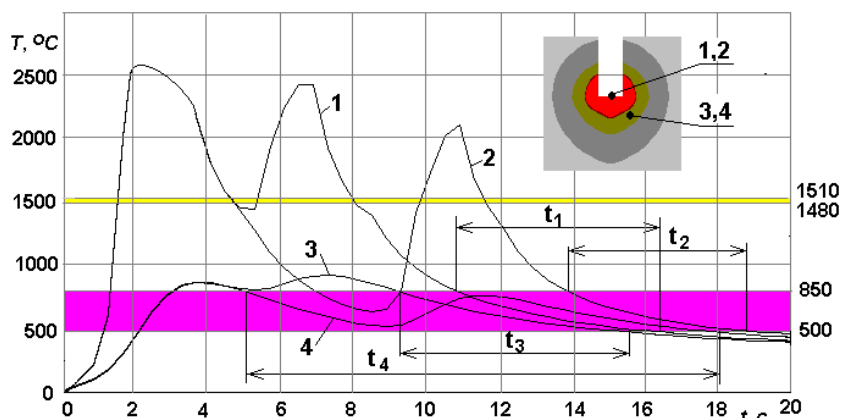


Рис. 21. Термические циклы в ЗТВ, сварочной ванне и шве при двухдуговой сварке при разном расстоянии между дугами: 1,2 – на поверхности шва, 3,4-в ЗТВ, 1,3-при расстоянии между дугами 20 мм, 2,4 – 40 мм

Полученные результаты показывают, что изменение расстояния между дугами позволяет регулировать механические свойства в ЗТВ (в частности повысить ударную вязкость) и исключить возникновение трещин, не прибегая к дополнительному подогреву кромок и шва, что значительно упрощает промышленную реализацию процессов сварки.

Известно, что введение марганца, молибдена, никеля, хрома, меди в состав электродной проволоки снижает температуру полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и тормозит его, способствуя формированию бейнитной структуры и является благоприятным фактором улучшения механических свойств соединений. Было установлено, что при сварке стали 20ХГСНМ по узкому зазору и длительности охлаждения $850-500^{\circ}\text{C}$ $t_{85} = 24$ с, для получения необходимых механических свойств эффективным является применение проволоки ОК Autrod 13.31.

В главе 5 представлены результаты разработки технологических требований к производственному процессу и оборудованию для двухдуговой многопроходной сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники.

При сварке по узкому зазору необходимо учитывать возможные погрешности параметров сварки, которые влияют на размеры шва и могут приводить к возникновению недопустимых дефектов шва. К этим параметрам отнесены следующие: электрические, геометрические, динамические. Используя функцию Лапласа рассчитали вероятность

возникновения дефектов сварки, причиной которых является нестабильность параметров режима.

Высокая вероятность несплавлений или межслойных непроваров у боковой стенки разделки обусловлена общей нестабильностью всех значимых параметров процесса сварки. Однако вклад при этом каждого из этих параметров будет различным (рис. 22).

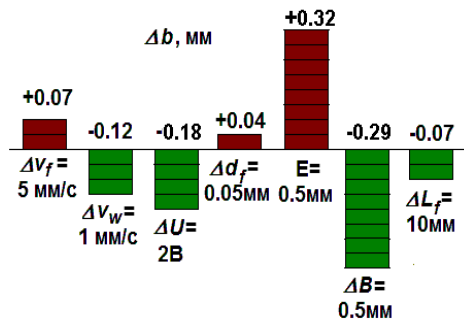


Рис. 22. Вклад нестабильности отдельных параметров процесса сварки в узкую разделку на глубину проплавления боковой стенки разделки на границе предшествующего слоя (Δb)

Из проведенных вычислений следует, что для того чтобы гарантированно избежать возникновения межслойных непроваров при многопроходной дуговой сварке по узкому зазору необходимо установить параметры режима процесса, которые обеспечивают глубину проплавления, вдвое превышающую среднеквадратичное отклонение проплавления из-за нестабильности параметров сварки. Если это невозможно, то для получения однозначного решения необходимо принять, что все значимые параметры X , для которых определяется допуск, вызывают равные отклонения S_0 глубины проплавления и решается вариационная задача

$$\sqrt{\sum_{X=1}^m \min^2(S_X, S_0)} \xrightarrow{S_0 = \text{var}} S_D$$

где S_D – допустимое рассеяние глубины проплавления, при котором вероятность возникновения непровара приемлема.

Процедура решения этой задачи иллюстрируется диаграммой на рис.23.

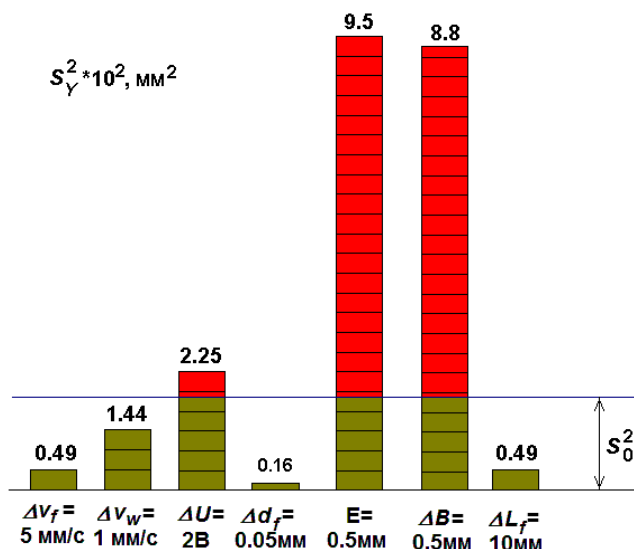


Рис. 23. Диаграмма, отражающая решение задачи отбора параметров для ограничения их допусками

Анализ влияния нестабильности химического состава стали 20ХГСНМ и сварочной проволоки Св-08Г2С показал, что оптимальными по прочностным свойствам и их стабильности являются режимы сварки, обеспечивающие длительность охлаждения t_{85} 15 – 25 с, рис. 24.

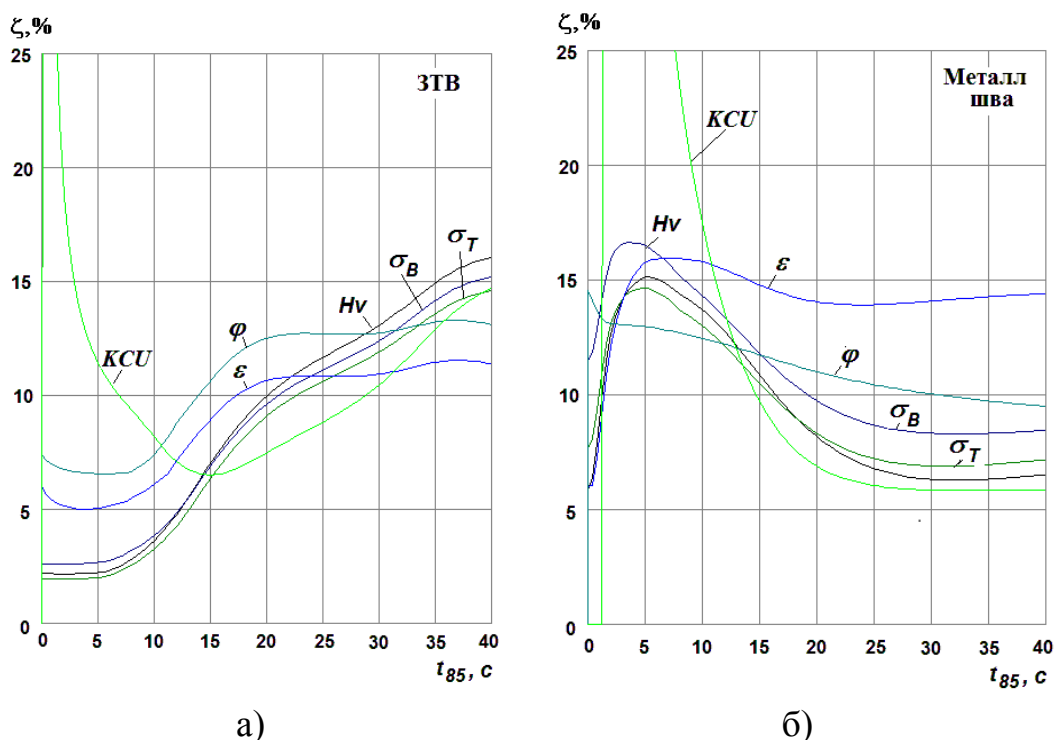


Рис. 24. Влияние длительности t_{85} охлаждения металла ЗТВ на вероятное относительное отклонение от номинального ζ значений механических свойств основного металла (а) стали 20ХГСНМ и наплавленного металла (б)

Полученные данные позволили сформулировать технологические требования к сварке корпусных конструкций.

Критериями качества формирования шва при сварке по узкому зазору являются проплавление на заданную величину боковой стенки разделки в зоне сопряжения ее с предшествующим слоем и вогнутая поверхность слоя шва.

Для получения высокой производительности и обеспечения устойчивого положения дуги в узкой разделке целесообразно использовать электродную проволоку диаметром 1,6 и 2,0 мм. При выполнении первого прохода качественное формирование слоя обеспечивается значениями скорости сварки до 12 мм/с и тока до 370 А. По мере заполнения разделки и увеличения ее ширины мощность дуги следует увеличивать, повышая как ток, так и напряжение дуги. При выполнении завершающих проходов, необходимо ограничивать скорость сварки даже при значительном токе из-за недостаточного прогревания боковых стенок. Предельная ширина разделки, при которой обеспечивается полный провар кромок разделки и формируется вогнутая поверхность наплавленного слоя составляет 8 – 9 мм, при токе дуги

до 370 А. Если разделка кромок шире, необходимо выполнять сварку слоя за два или более проходов.

При двухдуговой сварке максимальная длительность охлаждения в диапазоне температур полиморфного превращения ($850 - 500$ °С) должна обеспечиваться расположением второй дуги на расстоянии, при котором существует разделение общей сварочной ванны на две независимые.

Для минимизации вероятности возникновения непроваров допуск на отклонение электрода от плоскости симметрии стыка должен составлять $\pm 0,25$ мм. Для обеспечения такой точности, требуется применение систем автоматической коррекции электрода в разделке. Отклонения в скоростях подачи электродной проволоки и сварки не должно превышать $\pm 5\%$. Для этого оборудование должно обеспечивать стабилизацию основных параметров процесса сварки в следующих пределах: тока сварки - до $\pm 1,0\%$, скорости сварки - до $\pm 2,0\%$, скорости подачи электродной проволоки - до $\pm 2,0\%$, колебаний горелки - до $\pm 1,0\%$.

Автоматы для двухдуговой сварки протяженных швов должны быть построены по блочно-модульному принципу с отдельной компоновкой трехкоординатной каретки, двух аппаратур управления и двух механизмов подачи проволоки, каждый из которых должен быть укомплектован своим сварочным источником. Полуавтоматы для механизированной сварки также должны быть построены по блочно-модульному принципу с отдельной компоновкой механизма подачи проволоки и сварочного источника.

В главе 6 описана практическая реализация процессов многопроходной сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники. Для решения проблем создания высокопроизводительных технологий сварки по узкому зазору в качестве инструмента использована обобщенная физико-математическая модель процесса двухдуговой сварки плавящимся электродом по узкому зазору, приведенная в главе 2, которая позволяет воспроизводить форму сварочной ванны, геометрические параметры многопроходного шва и механические свойства сварного соединения.

Результаты разработки технологических требований к производственному процессу и оборудованию для двухдуговой многопроходной сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники использованы при создании технологий автоматической двухдуговой сварки протяженных швов и однодуговой механизированной сварки в зауженные разделки толстостенных корпусных конструкций специальной техники из высокопрочных сталей, обеспечивающих требуемые служебные свойства сварных соединений.

При разработке технологий и оборудования для сварки корпусных конструкций учтено, что в зауженной разделке возможна потеря устойчивости саморегулирования дуги, также в соответствии с технологическими требованиями, сформулированными в главе 5, был

сконструирован сварочный источник Micor 500, представленный на рис. 25.-Данные источники могут комплектоваться подающими механизмами для однодуговой механизированной сварки (рис. 25, б).



Рис. 25. Сварочный источник Micor 500 (а) и сварочные полуавтоматы MicorMIG 500 (б) в едином и раздельном исполнении

Данным источником комплектуются как полуавтоматы для однодуговой сварки, так и автоматы АДФГ-502 для двухдуговой сварки.

С целью снижения вероятности несимметричного формирования шва и возникновения несплавлений вследствие отклонений расположения электрода в разделке было разработано специальное устройство для правки электродной проволоки, а также бесконтактная система коррекции, использующая дугу в качестве датчика. Данные мероприятия позволили существенно повысить качество формирования швов при сварке по узкому зазору, рис. 26.

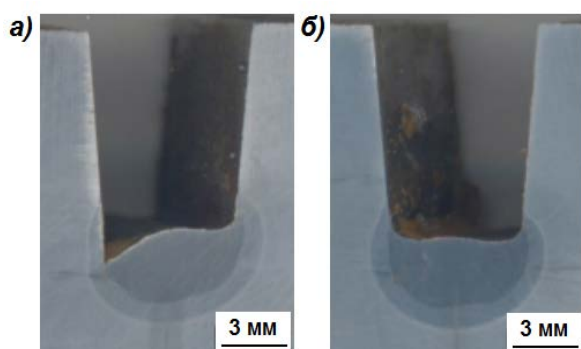


Рис. 26. Макрошлифы швов при дуговой сварке в узкую разделку: а - система коррекции выключена; б - система включена

Определены технологические параметры процесса автоматической двухдуговой сварки протяженных стыковых швов (рис. 27, табл. 7, 8), снижающих вероятность возникновения межслойных несплавлений.

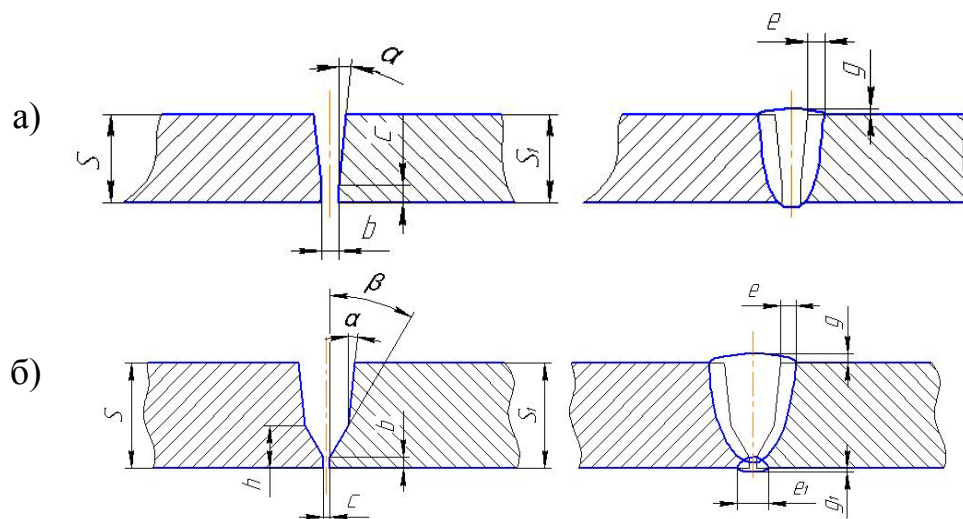


Рис. 27. Характерная форма зауженной разделки для стыковых соединений: а – для толщин стыка до 42 мм; б – для толщин более 30 мм

Таблица 7. Геометрические параметры зауженной разделки и швов для стыковых соединений

Толщина стенки S, мм	Рисунок	Параметры разделки								
		α , град	β , град	b, мм	c, мм	h, мм	e, мм	g, мм	e ₁ , мм	g ₁ , мм
15,0 – 42,0	6.1a	6 ± 1	-	4 ± 1	3 ± 1	-	3 ± 1	3 ± 1	-	-
30,0 - 80,0	6.1б	6 ± 1	30 ± 2	2 ⁺¹ ₋₂	2 ± 1	12 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	9 ± 2	2 ± 1

Таблица 8. Режимы двухдуговой многопроходной сварки сплошной электродной проволокой протяженных швов корпусных конструкций

Параметры	Режимы сварки и наименование слоя					
	1-й проход		Последующие проходы			
	Корневой слой	Горячий проход	Заполняющие слои		Облицовочный слой	
	Горелка №					
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Род тока / Полярность	Постоянный / Обратная					
Диаметр проволоки, мм	1,4-2,0					
Скорость подачи проволоки, м/мин	12-16	10-14	9-15	8-14	9-12	8-11
Вылет проволоки, мм	Изменяется автоматически по мере заполнения разделки					
Сварочный ток, А	250-295	320-370	310-370	300-360	190-240	180-235
Напряжение на дуге, В	24-25,5	30,5-36,0	28,5-36,0	28,5-35,5	22,5-24,5	
Скорость сварки, м/мин	1,0-1,7		0,3-1,0		0,5-0,9	
Скорость колебаний горелки, мм/сек	10-20	20-60	50-80		80-100	
Размах колебаний, мм	Устанавливается в зависимости от ширины разделки					
Защитный газ	82% Ar + 18% CO ₂					
Расход газа, л/мин	В зависимости от типа соединения от 15-18 до 25-30					

Одновременно были определены технологические параметры процесса однодуговой механизированной сварки (рис.28, табл. 9).

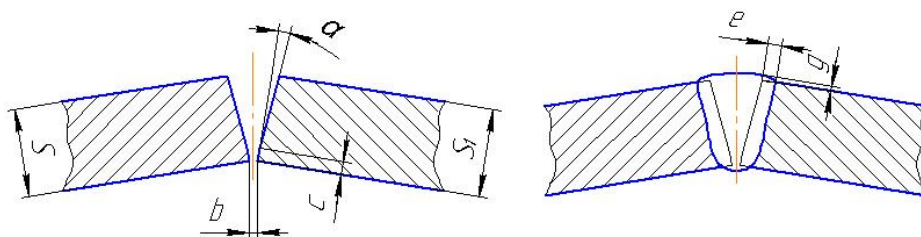


Рис. 28. Характерная форма зауженной разделки для угловых соединений

Таблица 9. Режимы механизированной сварки в углекислом газе угловых швов, а также соединений под острыми и тупыми углами

Слой шва	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Вылет электрода, мм
Все слои шва	280-320 ¹	28-30 ¹	15-18
	170-240 ²	22-26 ²	
Все слои шва	300-350 ¹	30-32 ¹	15-18
	270-320 ²	22-26 ²	
1-угловые сварные соединения; 2-соединения под острыми и тупыми углами			

В установленном порядке контрольные сварные соединения (КСС) были испытаны для оценки разработанных технологий и оборудования. После сварки КСС были подвергнуты неразрушающим и разрушающим методам контроля, результаты которых подтвердили требуемые свойства КСС, что необходимо для обеспечения необходимых технических показателей специальной техники.

Промышленная реализация предложенной технологии двухдуговой многопроходной сварки представлена на рис. 29.



Рис. 29. Сварка протяженных швов автоматом для двухдуговой сварки тракторного типа



Рис. 30. Однодуговая механизированная сварка в труднодоступных местах

Промышленное использование в производственных условиях разработанных технологий сварки и оборудования: двухдуговых автоматов АДФГ-502 Шторм и однодуговых сварочных полуавтоматов MicorMig 500 на ОАО «НПК «Уралвагонзавод», АО «Уралтрансмаш» при изготовлении корпусных конструкций, а также крупногабаритных изделий на ЗАО «Уральский турбинный завод» и ЗАО «Курганстальмост» показало, что оно обеспечивает существенное, более чем в 1,5-2,5 раза повышение производительности процессов сварки и снижение процента брака на 18 %.

Экономический эффект от внедрения разработки составил более 30 млн. руб.

Общие выводы

1. Разработаны элементы теории формирования многопроходного шва при одно- и двухдуговой сварке по узкому зазору:

- предложено разделение теплоты сварочной дуги, горящей в узкой разделке, на потоки, создаваемые тепловыделением в катодной области, излучением столба дуги и тепломассопереносом каплями электродного металла в сварочную ванну с учетом распределения теплового потока от этих капель по поверхности сварочной ванны.

- при определении удельной мощности теплового потока катодного пятна и излучения столба дуги предложено учитывать расстояния между торцом электродной проволоки и точкой поверхности сварочной ванны, что позволяет рассчитать с меньшей погрешностью длину дуги;

- при определении мощности теплового потока от дуги и капель электродного металла предложено учитывать форму поверхности сварочной ванны для описания распределения тепла капли по поверхности ванны;

- при оценке влияния гидродинамического давления на поверхность сварочной ванны, обусловленного различием значений скорости течения расплава по длине ванны необходимо учитывать изменение геометрии разделки по мере её заполнения.

2. Разработана физико-математическая модель формирования сварных соединений при одно- и двухдуговой многопроходной сварке

плавящимся электродом по узкому зазору, основанная на системе уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны, учитывающих влияние на ее форму гидродинамического напора плавящегося металла и изменение формы кромок при последовательном наложении валиков многопроходного шва.

3. Экспериментально показано, что физико-математическая модель удовлетворительно воспроизводит формирование одно- и многопроходного шва при сварке одной и двумя дугами стали как тонких листов (≤ 10 мм) без разделки кромок, так толстого металла (≥ 20 мм) в зауженной разделке.

4. Установлено, что главными особенностями сварки в зауженной разделке является снижение устойчивости горения дуги вследствие периодических изменений температуры и сопротивления вылета электрода, а также чувствительность распределения мощности дуги к расположению электрода в разделке, приводящие к несимметричному формированию сварочной ванны, возникновению непроваров и межслойных несплавлений.

5. Показано, что качественное формирование шва при однодуговой сварке по узкому зазору обеспечивается, если высота наплавленного слоя не превышает 0,3-0,5 ширины разделки, длина дуги равна высоте наплаваемого слоя, и использовании электродной проволоки диаметром 1,6-2,0 мм.

6. Разработаны технологические рекомендации по одно- и двухдуговой сварке высокопрочных сталей по узкому зазору, учитывающие особенности формирования проходов и позволяющее получать качественные сварные соединения без предварительного и сопутствующего подогрева.

7. Показано, что при двухдуговой сварке высокопрочных сталей эффективным способом обеспечения требуемых механических свойств металла в ЗТВ является возможность регулирования расстояния между сварочными дугами (термическим циклом), а в сварном шве - рациональный подбор химического состава электродной проволоки.

8. Показано, что при двухдуговой сварке рациональным по расходу энергии и управляемости процессом сварки является расстояние между дугами, соответствующее разделению общей сварочной ванны на две, при котором обеспечивается возможность независимого регулирования глубины проплавления предшествующего слоя током первой дуги, а формы поверхности наплаваемого валика - током и напряжением второй дуги.

9. Установлено, что оптимальное расстояние между дугами при двухдуговой сварке, обеспечивающее максимальную ударную вязкость и позволяющее сваривать без предварительного подогрева, совпадает с длиной области пребывания металла в диапазоне температур полиморфного превращения от воздействия первой дуги.

10. Результаты работы использованы при разработке технологий двухдуговой сварки в узкую разделку сварных швов элементов корпусных конструкций (20 – 40 мм) из высокопрочных сталей.

11. Осуществлено промышленное внедрение разработанных

технологий и сварочного оборудования: на ОАО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод», АО «Уралтрансмаш», а также ЗАО «Уральский турбинный завод» и ЗАО «Курганстальмост».

Общий экономический эффект от внедрения разработки составил более 30 млн. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Милютин В.С., Шолохов М.А. Производство и испытания сварочного оборудования в России и странах СНГ // Тяжелое машиностроение. 2003. № 12. С. 27 – 30.
2. Новые разработки в области дуговой сварки в защитных газах / Шолохов М.А. [и др.] // Автоматическая сварка. 2004. №5. С. 40 – 46.
3. Шолохов М.А. Влияние содержания серы в основном металле на геометрические размеры сварного шва при сварке плавящимся электродом в защитном газе // Сварка и диагностика. 2008. №5. С. 15 – 16.
4. Шолохов М.А., Шалимов М.П. Совместное влияние серы и кислорода на характер проплавления сталей с пониженным содержанием вредных примесей // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 10 – 14.
5. Шолохов М.А., Бузорина Д.С., Лунина Е.В. Эффективность эксплуатации инверторных источников питания // Сварка и диагностика. 2012. № 3. С. 26 – 29.
6. Распределение тепловой мощности дуги при сварке плавящимся электродом по узкому зазору/ М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2012. № 4. С. 18 – 23.
7. Рахматуллин Т.А. Шолохов М.А., Бузорина Д.С. Проблемы внедрения зауженных разделок при сварке корпусных конструкций специальной техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 4. С. 64 – 66.
8. Оптические системы контроля положения электрода в разделке стыка при MIG/MAG сварке / М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2012. № 6. С. 36 - 40.
9. Компьютерный анализ устойчивости дуги при сварке плавящимся электродом по узкому зазору / М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2013. № 1. С. 27 – 31.
10. Зиновкин А.А., Шолохов М.А., Фивейский А.М. Резонансные технологии в сварке: этапы развития // Сварка и диагностика. 2013. № 1. С. 48 – 52.
11. Моделирование особенностей формирования шва при сварке плавящимся электродом по узкому зазору / Шолохов М.А. [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 11 – 16.
12. Компьютерный анализ особенностей заполнения разделки при двухдуговой сварке плавящимся электродом по узкому зазору / Шолохов М.А. [и др.] // Сварка и диагностика. 2013. № 3. С. 14 – 19.
13. Инженерный анализ влияния параметров двухдуговой сварки

высокопрочных сталей по узкому зазору на свойства сварного соединения / М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2013. № 5. С. 12 – 17.

14. Шолохов М.А., Бузорина Д.С. Расчет параметров режима наплавки пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах // Автоматическая сварка. 2013. № 7. С. 63 – 67.

15. Sholokhov M.A., Buzorina D.S. Calculation of mode parameters of wall bead deposition in downhand multi-pass gas-shielded welding // The Paton welding journal. 2013. No 7. P. 61 – 65.

16. Бузорина Д.С., Шолохов М.А. Влияние технологических параметров на формирование пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 9. С. 81 – 86.

17. Выбор состава электродной проволоки для обеспечения служебных свойств соединений при сварке высокопрочных сталей по узкому зазору / М.А. Шолохов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 10. С. 9 – 14.

18. Шолохов М.А., Бузорина Д.С. Управление сварочным током в зависимости от положения электрода в разделке при сварке с поперечными колебаниями в защитных газах // Сварка и диагностика. 2014. № 1. С. 19 – 22.

19. Импульсные технологии управления каплепереносом при MIG/MAG сварке / М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2014. № 3. С. 39 – 44.

20. Опыт внедрения роботов в сварочное производство / М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2014. № 4. С. 41 – 43.

21. Шолохов М.А., Куркин А.С., Полосков С.И. Оценка влияния формы разделки и режимов сварки на остаточные напряжения в корпусных конструкциях специальной техники // Сварка и диагностика. 2014. № 6. С. 50 – 55.

22. Бузорина Д.С., Шолохов М.А., Шалимов М.П. Совершенствование методики расчета параметров режима многопроходной сварки в защитных газах // Автоматическая сварка. 2014. № 10. С. 28 – 31.

23. Экспериментальная проверка результатов моделирования формирования шва при многопроходной сварке плавящимся электродом по узкому зазору / М.А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. 2015. № 2. С. 39 – 44.

24. Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Оценка вероятности возникновения дефектов формирования швов и расчет допусков на параметры процесса дуговой сварке по узкому зазору // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 5. С. 66 – 73.

25. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Гончаров С.Н. Пути повышения производительности сварки корпусных конструкций специальной техники // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 5. С. 10 – 14.

26. Шолохов М.А., Куркин А.С., Полосков С.И. Влияние формы разделки на остаточные напряжения в корпусных конструкциях специальной

техники // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 6. Ч. 2. С. 144 – 152.

27. Шолохов М.А. Моделирование влияния отклонений процесса сварки и состава электродного металла на свойства сварных соединений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 6. Ч. 2. С. 153 – 163.

28. Сварка в защитных газах с колебаниями электрода. Тепловая задача / М.А. Шолохов [и др.] // Сварочное производство. 2015. № 7. С. 3 – 8.

29. Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Методика расчета параметров двухдуговой многопроходной сварки плавящимся электродом в защитных газах // Сварочное производство. 2015. № 7. С. 9 – 16.

30. Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Система коррекции положения плавящегося электрода с использованием дуги в качестве датчика для автоматической сварки продольных швов по узкому зазору // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 8. С. 7 – 10.

31. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Разиков М.Н. Исследование особенностей термомеханических процессов при сварке изделий из высокопрочных сталей с различной формой разделки кромок // Сварочное производство. 2015. № 9. С. 7-12.

32. Шолохов М.А. Технологические требования к производственному процессу и оборудованию для сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники // Сварка и диагностика. 2015. № 4. С. 49 – 51.

33. Шолохов М.А. Перспективные технологии и оборудование для сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С. 46 – 51.

34. Шолохов М.А. Траекторные задачи при автоматической и роботизированной дуговой сварке. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 168 с.

35. Патент 2430821 (РФ), МКП В23К 37/02. Сварочный автомат / М.А. Шолохов [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Шторм» (RU). - № 20100126116/02; заявл. 25.06.2010; опубл. 10.10. 2011 // Бюл. № 28. С. 664.

36. Полезная модель 129855 (РФ), МПК В21F1/02. Устройство для правки сварочной проволоки / М.А. Шолохов [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Шторм» (RU). - № 2013106088/02; заявл. 12.02.2013; опубл. 10.07.2013 // Бюл. № 19. С. 46.

37. Полезная модель 144972 (РФ), МПК В23К 37/02. Устройство позиционирования сварочной горелки / М.А. Шолохов [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Шторм» (RU). - № 2014116915/02; заявл. 25.04.2014; опубл. 10.09.2014 // Бюл. № 25.

38. Полезная модель № 139365 (РФ), МПК В23К. 9/16. Двухдуговой сварочный автомат / М.А. Шолохов [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Шторм» (RU). - № 2013145038; заявл. 08.10.2013; опубл. 17.03.2014 // Бюл. № 11.