

М 85741
рленов Ленина, Октябрьской
Революции и Трудового Красного Знамени
государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

- На правах рукописи

КОНДАКОВ
Геннадий Фёдорович

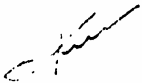
ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛ

ШВА В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

Специальность 05.03.06 – технология и машины сварочного
производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук


Москва 1992

Работа выполнена в Калужском филиале Московского орденов
Ленина, Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени
государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

доктор технических наук, профессор
РЕДЧИЦ В.В.

доктор технических наук, профессор
СУДНИК В.А.

Ведущее предприятие: Калужский турбинный завод

Защита ос

на заседании
при Московск
им.Н.Э.Баум
107005, Моск

Ваш от:
гербовой печ
С диссертаци
им.Н.Э.Баум

ий

Автореф

УЧЕНЫЙ
СПЕЦИАЛ
К.Т.Н.

М 85741

Подписано к

Типография М

100 экз.

деформировании, влияние на этот процесс неравномерности коэффициента трения, поля собственных сварочных и дополнительных технологических напряжений; расчет температурных полей при сварке с наличием принудительных стоков теплоты в различных температурных диапазонах; выработка критериев качественного формирования сварного соединения при деформационном воздействии на металл в процессе сварки; выяснение влияния параметров режима работ на ряд важнейших свойств сварных соединений: статическую, усталостную прочность, коррозионную стойкость, пластичность, напряженное состояние, деформируемость и др. Это в первую очередь относится к тонкостенным сварным конструкциям из АС и Т1 сплавов и аустенитной стали 12Х18Н10Т, широко используемых при изготовлении изделий, работающих в сложных условиях.

В реферируемой диссертационной работе эти важные задачи решены с позиций современных достижений теорий формоизменения материала, тепловых процессов, сварочных напряжений и деформаций, а также других смежных отраслей науки и техники.

Ц е л ь и о с н о в н ы е з а д а ч и и с с л е - д о в а н и я . Целью настоящей работы является радикальное повышение работоспособности сварных тонкостенных конструкций ответственного назначения из АС и Т1 - сплавов и аустенитной стали. Для её достижения решены следующие основные задачи:

- анализ эффективности существующих путей повышения работоспособности сварных тонкостенных конструкций и разработка на его основе классификации способов местного пластического деформирования;
- установление закономерностей формоизменения очага деформации при местном нагружении металла шва;
- выработка критериев совмещенных процессов сварки и прокатки в различных температурных зонах, ответственных за улучшение свойств сварных соединений;
- создание математических моделей тепловых и деформационных процессов с определением основных технологических параметров деформирования;
- разработка руководящих материалов и конструкторско-технологической документации по использованию деформационных методов в промышленности;
- выявление области применения деформационно-технологических методов;
- внедрение деформационно-технологических методов при

производстве сварных тонкостенных конструкций.

Методы исследования. Поставленные задачи решены сочетанием анализа и синтеза экспериментальных и теоретических методов исследования. Экспериментальные исследования по определению перемещений, остаточных напряжений проведены с использованием известных и оригинальных методик дискретной и непрерывной записи деформационного сигнала на образцах, сваренных по существующей технологии, а также на образцах, прокатанных в различных режимах. Влияние обработок на структуру сварных соединений, их овойства определяли с применением современных методов металловедения, в том числе, рентгеноструктурного анализа (УРС-60, камера РКУ-II4), электронномикроскопические исследования (микроскоп BS-242 "Тезла"). Механические испытания на ударную вязкость, коррозионную стойкость и др. выполняли с помощью стандартных и специальных методик.

Теоретические исследования базировались на положениях теорий сварочных деформаций и напряжений, тепловых процессов, релаксации и ползучести, металловедения и др. отраслей науки. Разработка и анализ физико-математических моделей совмещенных процессов сварки и прокатки выполнены с помощью ЭВМ.

Научная новизна. В работе выполнено теоретическое обобщение и решена крупная научно-техническая проблема, заключающаяся в установлении взаимосвязи деформационного воздействия на металл шва в процессе сварки с характеристиками сварного соединения, имеющей важное народнохозяйственное значение для повышения работоспособности сварных тонкостенных конструкций из Al , Ti - сплавов и аустенитной стали.

Обнаруженные взаимосвязи базируются на следующих основных результатах работы:

1. Теоретически установлена направленность течения металла в очаге деформации в зависимости от его геометрических размеров, шероховатости контактных поверхностей, сопротивления внешних зон, уровня и знака напряжений в зоне прокатки.

2. Экспериментально определены условия получения сварных соединений, близких по своим показателям основному материалу (пределу прочности, углу загиба, ударной вязкости, пластичности, напряженно-деформированному состоянию и др.), при прокатке металла шва в процессе сварки в различных температурных диапазонах;

3. Изучено влияние параметров деформирования (степени де-

(формации, температуры деформирования, диаметра ролика) при совмещенном процессе сварки и прокатки на формирование первичной, вторичной структуры и несущую способность сварного соединения;

4. Получено с учетом принудительных стоков теплоты в подкладку и ролик решение дифференциального уравнения теплопроводности, позволяющее регулировать термический цикл сварки;

5. Созданы математические модели определения основных параметров деформирования, учитывающие исходное состояние материала перед прокаткой, температурно-скоростные условия деформирования, влияние внешних зон и распределение остаточных напряжений.

П о л о ж е н и я , в ы н о с и м ы е н а з а щ и т у .

1. Модель течения металла при холодной прокатке шва узкими роликами, построенная на основе равенства работ на заданных перемещениях от вертикальных сил работе горизонтальных сил, приложенных к границам очага деформации, при наличии сил трения и внешних зон. При этом горизонтальные силы, вызванные действием сварочных, технологических напряжений, кривизной ролика и сопротивлением внешних зон, представлены в математической модели как доли горизонтальных сил, эквивалентных по своей работе вертикальной силе сжатия.

2. Условия качественного формирования сварного соединения при местном деформировании в процессе автоматической сварки в защитных газах, заключающиеся в следующем:

— при прокатке в интервале $T_d - T_c$ кристаллизация хвостовой части сварочной ванны должна протекать только под давлением при обкатке усиления шва заподлицо с основным материалом со степенями деформации, превышающими 10-12%. Такие условия способствуют образованию однородной мелкозернистой структуры с равномерной пластической деформацией по всему сечению шва и обеспечивают снижение остаточных перемещений более чем на 70% и существенно уменьшают пористость;

— при горячей прокатке с целью получения дисперсной структуры по всему сечению должен задаваться температурный режим и степень деформации;

— при холодной прокатке определяющей является степень деформации, которая находится из равенства объема пластических деформаций укорочения от сварки объему пластических деформаций удлинения от прокатки, что позволяет добиться высокого эффекта правки и уменьшения уровня остаточных сварочных напряжений.

3. Механизм усиления воздействия на околошовную зону при выполнении комбинированной прокатки шва в обойме, заключающийся в том, что образующиеся при осадке металла под первым роликом продольные пластические деформации из-за высокой жесткости обоймы не реализуются. Это приводит к возникновению на участке между роликами продольных сжимающих напряжений, которые вызывают перераспределение части продольных деформаций в поперечные как в зоне первого, так и второго роликов.

4. Новый подход к определению температурных полей в процессе сварки для высокотемпературной зоны при наличии стоков теплоты состоящий в том, что задача разбивается на несколько этапов. Первоначально, с использованием классического решения о распределении температуры от подвижного сварочного источника тепла, находится начальное температурное поле, которое является исходным для расчета уточненных температур по дифференциальному уравнению теплопроводности. По результатам его решения определяется координата прокатного ролика. На втором этапе начальное температурное поле находится путем сложения температурного поля от источника и стока теплоты в ролик и подкладку с учетом повышенной теплоотдачи от свариваемого металла на ширине зоны прокатки в сварочный стол. Затем с учетом различного характера стоков теплоты, размывается уточненное температурное поле. Определяется новая координата установки прокатного ролика и производится сравнение её значения со значением, найденным на предыдущем этапе. Если полученная величина меньше или равна заданной точности расчета, то уточненное температурное поле соответствует температурному полю при совмещенном процессе сварки и прокатки.

5. Математическая модель определения усилия деформирования, заключающаяся в том, что задача по прокатке металла шва узкими роликами сводится к задаче по прокатке полосы, но с учетом влияния внешних зон, поля сварочных напряжений, температурно-скоростных факторов и способа осуществления местной деформации.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь . Теоретические основы деформационного воздействия на сварное соединение в процессе сварки, разработанная классификация способов местного деформирования использованы при создании новых технологических процессов по выполнению дуговой сварки. Внедрение комбинированной прокатки при производстве мостовых секций из алюминиевого сплава (Омский завод подъемных машин), высокотемпературной про-

катки при сварке гибкой муфты паросиловой установки из титанового сплава (Калужский турбинный завод) и др. свидетельствуют о высоких показателях обработок: существенно увеличивается срок эксплуатации изделий; уменьшается трудоемкость сборочно-сварочных операций; сокращается длительность производственного цикла. Новизна технологий и их эффективность подтверждена 4 авторскими свидетельствами на способы дуговой сварки.

Произведена оценка области применения деформационно-технологического направления по повышению работоспособности сварных соединений для широкого ряда конструктивных материалов.

Созданы математические модели формоизменения материала в очаге деформации, определения тепловых процессов, основных параметров деформирования, позволяющие не только управлять степенью воздействия на сварное соединение, но и использовать полученные зависимости для других технологических операций (точение, осадка, волочение, плакирование и др.).

Для реализации деформационных методов разработаны и внедрены в производство, учебный процесс руководящие материалы, конструкторско-технологическая документация, специализированное оборудование и оснастка с общим экономическим эффектом свыше девяти сот тысяч рублей.

А п р о б а ц и я р а б о т ы . Результаты работы доложены и обсуждены на III Всесоюзном симпозиуме АН СССР по технологическим остаточным напряжениям (1988 г.), на 33 международном научном симпозиуме в *Улеме* (1988 г.), на 26 чтениях по проблемам космического производства (1991 г.), на ряде Всесоюзных, Республиканских, Региональных и ведомственных НТК (1973–91 г.г.), а также на научных семинарах кафедр сварки МГТУ им. Н.Э.Баумана (1990 г.), КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана (1987, 1990 г.).

П у б л и к а ц и и . По результатам работы автором опубликованы 52 печатные работы, получены 4 авторских свидетельства на изобретения.

О б ъ е м р а б о т ы . Диссертационная работа состоит из шести глав (без введения), изложенных на 209 страницах машинописного текста, включает 2 приложения, 15 таблиц, 126 рисунков, выводы и список литературы из 230 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I посвящена анализу состояния вопроса по проблеме, обосновывающему поставленную цель и сформулированные выше задачи работы.

Проблема радикального повышения работоспособности сварных соединений, повышения степени соответствия их характеристик основному материалу, является одной из основных задач на современном этапе развития сварочного производства. Над решением этой проблемы работает большое количество ученых в отраслевых институтах, в ИЭС им. Е.О.Патона, а также в учебных заведениях. Анализ выполненных работ позволил выделить следующие основные направления повышения работоспособности сварных конструкций: металлургическое, конструкторское, технологическое и деформационно-технологическое. Указанные направления нашли применение в промышленности. Однако эффективность их использования различная. Так, применение методов металлургического, конструкторского, технологического направлений позволяет повысить 1-3 характеристики сварного соединения. Например, при назначении оптимальных параметров режима сварки тонкостенных конструкций из стареющего алюминиевого сплава В92 достигается существенное повышение плотности швов, несколько увеличиваются прочностные и пластические показатели. Остальные же характеристики - ударная вязкость, напряженно-деформированное состояние, коррозионная стойкость практически не изменяются.

Всестороннее воздействие на зону соединения оказывают методы местного пластического деформирования. Большой вклад в разработку этих методов внесли работы С.А.Куркина, В.А.Винокурова, В.М.Сагалевича, в которых показана возможность устранения сварочных деформаций, уменьшения остаточных напряжений и упрочнения зоны соединения путем послесварочной холодной прокатки ее узкими роликами. Существующая формула по определению усилия прокатки, требуемого для правки тонкостенных сварных конструкций, дает значения усилий, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными применительно к сварным конструкциям из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Однако, применение этой формулы для определения усилия прокатки к аналогичным конструкциям из Al , Ti - сплавов и аустенитной стали приводит к значительным погрешностям. Кроме того, холодная прокатка сопровождается снижением пластических показателей сварного соединения, неравномерностью

пластических деформаций, создаваемых по толщине прокатываемого материала. Для существенного снижения остаточных напряжений необходимо выполнять прокатку по всей ширине зоны пластических деформаций укорочения.

Повышение пластических показателей сварного соединения, производительности процесса, а также возможность воздействия на околошовную зону только при прокатке металла шва достигается, если осуществлять прокатку непосредственно вслед за дугой при температурах горячей деформации или на стадии кристаллизации сварочной ванны. Однако, многие научные аспекты методов деформационно-технологического направления не решены. В частности, не изучены закономерности деформирования материала в очаге деформации при местном нагружении, не определены критерии качественного формирования сварного соединения при совмещенном процессе сварки и прокатки в различных температурных зонах, не разработаны физические и математические модели процессов. Отсутствуют руководящие материалы для реализации новых технологических процессов. Решению поставленных выше кардинальных вопросов по проблеме повышения работоспособности сварных тонкостенных конструкций при использовании методов деформационно-технологического направления посвящены реферируемые ниже главы диссертации.

Глава 2 посвящена установлению закономерностей развития холодной деформации при местном нагружении путем прокатки или осадки.

Взаимосвязь элементов деформации при деформировании представлена в работе на основе постоянства объема в виде следующего выражения:

$$\epsilon_z = 1 - (1 + \epsilon_x)^{-1/K_y}$$

где ϵ_z — деформация по высоте очага; ϵ_x — продольная деформация; K_y — коэффициент уширения. Значения ϵ_x находятся путем решения термомеханической задачи или приближенно по величине усадочной силы. Для определения K_y , количественно характеризующего долю металла, перемещающегося в поперечном направлении при деформировании его по толщине, решается самостоятельная задача. Существующие пути определения K_y пригодны, в основном, для простых схем нагружения (осадке без внешних зон, отсутствия напряжений, однозначность коэффициента трения по различным направлениям) и учитывают лишь геометрические размеры очага в горизонтальной плоскости.

Автором для определения K_y при прокатке с внешними зонами использован принцип равенства работ на заданном перемещении.

Работа внешних вертикальных сил с учетом сил трения, приложенных к элементу с внешними зонами, заменяется работой только горизонтальных сил, приложенных к свободным границам тела. Сопротивление внешних зон, напряжения, вызванные сваркой, формой прокатного ролика и дополнительными технологическими напряжениями представлены в формуле как доли горизонтальных сил, эквивалентные по своей работе на заданных перемещениях вертикальной силе сжатия. Применительно к коротким очагам, размеры которых соответствуют прокатке сварного соединения, окончательное выражение для определения K_y имеет вид:

$$K_y = \left[1 + \frac{(1-\beta)(1+2\mu_y m \delta_n^2 / h_0 \sqrt{d h_0 \delta_z})}{(1-\alpha)(1+2\mu_x m \delta_n / h_0)} \right]^{-1},$$

где δ_n, h_0 - ширина зоны прокатки и высота металла перед роликом; μ_x, μ_y - коэффициенты трения соответственно в продольном и поперечном направлениях; m - коэффициент пропорциональности; d , δ_z - диаметр ролика и степень деформации по толщине; α, β - коэффициенты, зависящие от условий прокатки в продольном и поперечном направлениях и находятся из выражений:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_n + \alpha_a + \alpha_\phi, \quad \beta = \beta_c + \beta_n + \beta_a + \beta_\phi,$$

в которых $\alpha_c, \beta_c; \alpha_n, \beta_n; \alpha_a, \beta_a; \alpha_\phi, \beta_\phi$ - коэффициенты, учитывающие влияние сварочных σ_x и σ_y , технологических σ_{xH} , σ_{yH} напряжений, сопротивления продольных и боковых внешних зон, а также формы штампа (ролика) на деформирование при местном деформировании металла. Формулы для расчета этих коэффициентов при различных схемах прокатки с боковыми внешними зонами приведены в диссертации.

Графический анализ изменения коэффициента упрочнения показывает, что величина K_y зависит не только от шероховатости контактных поверхностей, но и от соотношения коэффициентов трения в продольном и поперечном направлениях. При $\mu_x = \mu_y$ с ростом их значений величина K_y уменьшается, а при $\mu_x < \mu_y$ увеличивается. Наличие боковых внешних зон, продольных растягивающих, как сварочных, так и дополнительных технологических напряжений, использование меньшего диаметра прокатных роликов при постоянной степени деформации ведет к снижению величины смещаемого объема металла в поперечном направлении. Большое влияние на величину K_y оказывает схема прокатки. При прочих равных условиях выполнение прокатки неприводными роликами с подпором увеличивает K_y по сравнению с прокаткой путем натяжения. Повышение температуры материала ска-

ывається на формозменненні в такій степені, в якій змінився коефіцієнт поверхнового тертя. Таким образом, змінюючи шероховатість контактних поверхностей, діаметр прокатного ролика, величину і знак додаткових технологічних напружень можна в широких межах регулювати направленість течії металу в очаг деформації і тим самим використовувати спосіб прокатки шва роликами в різних цілях: компенсації тільки подовжніх деформацій, подовжніх і поперечних деформацій, радикального удосконалення властивостей всього з'єднання.

Експериментальна оцінка запропонованої математическої моделі підтвердила як її високу достовірність, так і правильність тих фізических передумов, які прийняті при виведенні коефіцієнта уширення. Слід також відзначити, що формула для визначення K_y може бути використана для розрахунку формозменнення при вільній і місійній осадці з різним відношенням розмірів очага деформації.

В главі 3 наведені результати досліджень по впливу основних параметрів деформування на работоспособність сварних з'єднань із Ti і Al сплавів, аустенітної сталі 12Х18Н10Т, сформульовані і експериментально підтверджені критерії вибору оптимальних режимів прокатки для різних температурних діапазонів. Вибір температурних зон произведено на основі запропонованої автором класифікації способів місійного пластического деформування, згідно якої способи односторонньої прокатки поділяються на: високотемпературну - в діапазоні $T_{л} - T_{с}$; гарячу - в діапазоні $(0,55 - 0,7) T_{пл}$; теплу - $(0,35 - 0,5) T_{пл}$; холодну - при температурах нижче $0,3 T_{пл}$; комбіновану, являющуюся комбінацією двох і більше способів і здійснюючих впливів на метал шва одночасно. Крім цього, запропонована класифікація дозволяє намалювати шляхи підвищення ефективності способів місійного пластического деформування за рахунок прикладання к очагу додаткових напружень, дозволяючих, в залежності від знака напружень, інтенсифікувати процес течії металу в подовжньому або поперечному напрямках.

Розглянемо послідовально умови якісного формування з'єднання при різних способах прокатки.

Високотемпературна прокатка (ВТП). Суть цього способу заключається в тому, що пластическому деформуванню підлягає хвостова частина сварочної ванни (рис. 1). Прикладання деформуючого впливу змінює схему кристалізації із плоскої на

объемную. Причем в центральной части шва доминирующее влияние оказывает теплоотдача в ролик и подкладку. Это подтверждается математическими моделями процесса затвердевания, оставленными для каждого участка сварочной ванны по оси шва, на основе равенства количества теплоты, теряемого металлом и количества тепла, отводимого в ролик и подкладку, т.е. $dQ_1 = dQ_2$. Для I участка — передней части сварочной ванны, в котором осуществляется отвод теплоты перегрева расплавленного металла в формирующую подкладку, уравнение теплового баланса имеет вид:

$$c\delta_{жс}h_{жс}dT_1 = d_1(T_1 - T_n)dt, \text{ где } d_1 = \frac{B_n \cdot B_{жс}}{\sqrt{\pi} \ell_1 / \sqrt{(B_n + B_{жс})}} -$$

— коэффициент теплоотдачи от расплавленного металла к подкладке. Протяженность первого участка равна:

$$\ell_1 = \frac{\pi V \left[\frac{c\delta_{жс}h_{жс}(B_n + B_{жс})}{B_n \cdot B_{жс}} \ln \left(\frac{T_1 - T_n}{T_1 - T_n} \right) \right]^2}{4},$$

где $B_n = \sqrt{\lambda_n \cdot c\delta_n}$; $B_{жс} = \sqrt{\lambda_{жс} \cdot c\delta_{жс}}$; V — скорость сварки; T_1 , T_n — температура ликвидуса и температура подкладки на I участке.

Для третьего участка — хвостовой части сварочной ванны (со стороны ролика):

$$\delta_k [q_{кр} + 0.5(c_{жс} + c_k) \Delta T_{кр}] dh = R_3 (T_{кр} - T_B) dt, \text{ где}$$

$$R_3 = \left(\frac{1}{\alpha_{жс-к}} + \frac{0.25\delta}{\lambda_k} + \frac{1}{\lambda_{кр}} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_B} \right)^{-1} - \text{эффективный ко-}$$

эффициент теплоотдачи от жидкого металла воде; $q_{кр}$ — удельная теплота кристаллизации; $c_{жс}$, c_k — удельные теплоемкости жидкого и закристаллизовавшегося металла; $T_{кр}$, $\Delta T_{кр}$ — средняя температура кристаллизации и интервал кристаллизации; T_B — средняя температура воды в ролике; $\alpha_{жс-к}$, $\alpha_{к-р}$, α_B — коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_{жс-к} = \frac{B_{жс} \cdot B_k}{\sqrt{\pi} \ell_3 / \sqrt{(B_{жс} + B_k)}}, \quad \alpha_{к-р} = \frac{B_k \cdot B_p}{\sqrt{\pi} \ell_3 / \sqrt{(B_k + B_p)}},$$

$\alpha_B = 0.336 V_B^{0.85} (1 + 0.014 T_B)$; V_B — скорость потока воды в ролике.

Высота закристаллизовавшегося металла со стороны ролика:

$$h_p = \frac{2m}{\pi \cdot c} \left[\sqrt{t_3} - \frac{\pi}{c} \ln \left(\frac{c\sqrt{t_3} + \pi}{\pi} \right) \right],$$

$$z = \delta_k [q_{кр} + 0.5(c_{жс} + c_k) \Delta T_{кр}]; m = B_{жс} \cdot B_k \cdot B_p \lambda_k \cdot \lambda_p \alpha_B (T_{кр} - T_B), \text{ где}$$

$$c = \sqrt{\pi} \lambda_k \cdot \lambda_p \alpha_B [2B_{жс} \cdot B_p + B_k (B_p + B_{жс})];$$

$$\gamma = B_{жс} \cdot B_k \cdot B_p (0,25 \delta \lambda_p \alpha_B + \delta p \cdot \lambda_k \alpha_B + \lambda_k \lambda_p);$$

$$t_3 = d \cdot \arccos(1 - \frac{3\Delta h}{d}) / 2V;$$

δ_p - толщина стенки ролика.

Для второго участка - центральной части сварочной ванны и третьего участка со стороны подкладки равенство имеет вид:

$$\delta_{кр} [q_{кр} + 0,5(c_{жс} + c_k)] \Delta T_{кр} \alpha h = R_2 (T_{кр} - T_c) \alpha t, \text{ где}$$

$R_2 = \left(\frac{1}{\alpha_{жс-к}} + \frac{0,35}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_{к-п}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{п-с}} \right)^{-1}$ - эффективный коэффициент теплоотдачи от жидкого металла сварному стоку; $\alpha_{ж-к}$, $\alpha_{к-п}$, $\alpha_{п-с}$ - коэффициенты теплоотдачи, определяемые как и в предыдущем случае. Высота закристаллизовавшегося металла со стороны подкладки:

$$h_n = \frac{2P}{2 \cdot n} \left[\sqrt{\ell_2 / V} - \frac{a}{n} \ln \left(\frac{n \sqrt{\ell_2 / V} + a}{a} \right) \right], \text{ где}$$

$$p = B_{жс} \cdot B_k \cdot B_c \cdot \lambda_k \cdot \lambda_{n_2} (T_{кр} - T_1);$$

$$n = \sqrt{\pi} \cdot \lambda_k \cdot \lambda_{n_2} [2B_{жс} \cdot B_c (B_k + B_{n_2}) + B_k \cdot B_{n_2} (B_{жс} + B_c)];$$

$$a = B_{жс} \cdot B_k \cdot B_{n_2} \cdot B_c (0,35 \lambda_{n_2} + \delta_n \cdot \lambda_k);$$

δ - толщина свариваемого материала; δ_n - толщина подкладки.

Графический анализ полученных выражений показывает, что толщина закристаллизовавшегося металла, а следовательно, степень переохлаждения со стороны ролика, возрастает с увеличением диаметра прокатного ролика, степени деформации, толщины свариваемого материала, теплопроводности материала ролика, а также с уменьшением скорости сварки и толщины стенки ролика. Толщина закристаллизовавшегося металла со стороны подкладки также определяется скоростью сварки, материалом и толщиной формирующей подкладки.

Кроме переохлаждения на формирование первичной структуры металла шва существенное влияние оказывают условия деформирования и степень деформации. При кристаллизации под давлением, когда расплавленный металл не выходит за ось ролика, вероятность получения мелкозернистой структуры по всему сечению высокая и в основ-

ном определяется степень деформации по толщине материала в зоне прокатки. Это подтверждается характером микро- и макроструктуры. При сравнительно небольших обжатиях, $\epsilon_z < 3 + 5\%$, её влияние проявляется лишь в приконтактных зонах. С увеличением степени обжатия действенные ролики на дисперсность структуры по сечению шва возрастает и при $\epsilon_z \geq 10 + 12\%$ мелкозернистая структура охватывает все сечение. Измельчение структуры при увеличении степени деформации проявляется за счет роста двух факторов: переохлаждения и давления ролика, которые способствуют образованию по оси шва зародышей меньшего критического размера, а также увеличения их числа за счет дробления уже образовавшихся кристаллитов на границе сплавления. Если же расплавленный металл выходит за ось ролика, неоднородности зерна по сечению шва не удастся избежать и при значительной степени деформации. Оптимальные степени деформации при кристаллизации металла под давлением, кроме формирования мелкозернистой структуры, определяются также и эффективностью предотвращения сварочных перемещений. Установлено, что наибольший эффект по предотвращению деформаций достигается при полном заглаживании оптимальных усилий шва заподлицо с основным материалом. При этом эффективность правки достигается до 90%.

Значительное снижение остаточных перемещений с применением ВТП происходит в результате существенного уменьшения неравномерности распределения пластических деформаций укорочения по толщине материала и предотвращения возможности деформации стыкуемых кромок вследствие их гарантированного поджатия к подкладке.

Измельчение зерна при ВТП положительно сказывается на широком спектре характеристик сварного соединения: пределе прочности, угле загиба, ударной вязкости, циклической прочности, коррозионной стойкости, косвенно свидетельствующих о повышении работоспособности сварной конструкции. Так, на оптимальных режимах деформирования повышение перечисленных выше характеристик для сплава ВТИ-I следующее: σ_B на 10%; α на 40%; КС - в 2,3 раза; σ_{-I} на 35%. Содержание водорода в шве упало более чем на 10%, плотность металла шва возросла на 1%.

Горячая прокатка (III). Основными параметрами процесса являются температура деформирования и степень деформации, которые в ходе исследований на сплавах AlMg и В92 варьировались в интервалах: T - от 300° до 525°C ; ϵ_z - от 2 до 35%. В указанных интервалах в большей степени обнаружено изменение таких показателей как угол загиба, ударная вязкость шва. В меньшей степени - преде-

ла прочности, уровня остаточных напряжений и перемещений. Максимальная эффективность правки достигнута немного более 30%, а уменьшение максимальных напряжений растяжения не более 10+15%. Кроме того, для термически упрочняемого сплава В92 отмечено заметное влияние на свойства сварного соединения при совмещенном процессе сварки и ПП скорости сварки. Исходя из анализа прочностных и пластических показателей сварных соединений оптимальные параметры деформирования находятся в следующих диапазонах: для сплава В92 - $T_2 = 380^{\circ} - 450^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_2 = 10+20\%$; $V = 24-35\text{м/ч}$, для сплава АМг6 - $T_2 = 390^{\circ} - 420^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_2 = 15+25\%$.

Улучшение пластических показателей в установленных диапазонах деформирования составляет по углу загиба для сплава В92 - более чем 2,5 раза, а для сплава АМг6 - в 3 раза. Такое радикальное повышение пластичности после ПП обусловлено структурным состоянием зоны соединения, характеризующимся однородной и диспергированной структурой по всему сечению шва. Формирование мелкозернистой структуры при ПП происходит за счет дробления первичных кристаллитов. Этот процесс приобретает объемный характер при $\epsilon_2 > 7+8\%$. По мере дальнейшего увеличения ϵ_2 линия сплавления размывается, подавляются макронесплошности.

Холодная прокатка (ХП). Основным параметром этого процесса является степень деформации. ХП применяется для устранения сварочных перемещений и уменьшения уровня остаточных напряжений.

В работе предложено находить ϵ_2 из условия равенства усадочной силы, создаваемой пластической деформацией укорочения от сварки, реактивной силе, определяемой объемом пластических деформаций удлинения от прокатки, т.е.

$$P_{yc} = R, \text{ где } P_{yc} = Bq/V; \quad R = E\epsilon_{x_{пл. упр.}} \delta_n h_0.$$

Откуда, при условии, что $\epsilon_{x_{пл. упр.}} = \epsilon_2(1 - K_y)$, определяется требуемая степень деформации

$$\epsilon_2 = Bq / [E V h_0 \delta_n (1 - K_y)],$$

где B - коэффициент, учитывающий влияние материала, режима сварки, жесткости конструкции на величину усадочной силы; q/V - погонная энергия сварки.

Величины коэффициента B (Нсм/Дж), полученные экспериментально для сплава ВТИ-1 и стали 12Х18Н10Т в зависимости от удельной погонной энергии сварки $q/V\delta$ (кДж/см²) находятся соответственно из следующих выражений:

$$B_{ТИ} = 21 - 0,18 q/V\delta; \quad B_{18-8} = 19,82 - 0,42 q/V\delta.$$

Расчетные по приведенной математической модели требуемые степени деформации для устранения сварочных перемещений удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Расхождение в результатах составляет менее 10%.

Комбинированная прокатка (КП). Отличительной особенностью процесса является то, что деформирование происходит одновременно в двух температурных зонах: в высокотемпературной и в зоне теплой или холодной деформации. При этом достигается комплексное воздействие на зону соединения. За счет высокотемпературной или горячей деформации — улучшение пластических показателей, формирование дисперсной структуры по всему сечению шва, а посредством холодной деформации устраняются сварочные деформации и остаточные напряжения растяжения. Реализация КП на практике возможна по двум схемам: со свободными роликами и жестко связанными роликами. Каждая из схем имеет свои преимущества. Первая — возможность плавного регулирования и независимого задания усилия на каждый ролик, а вторая — более глубокого воздействия пластической деформации от прокатки из-за сжимающих напряжений между роликами на околошовную зону. Вне зависимости от схемы КП повышение температуры деформирования под вторым роликом вызывает уменьшение эффективности снижения уровня сварочных напряжений. Особенно заметно это происходит при температурах, вызывающих интенсивное разупрочнение материала. Компенсация пластических деформаций от сварки при КП жестко связанными роликами достигается при степенях деформации несколько больших, чем при одноступенчатой прокатке при той же температуре. Это связано с тем, что часть продольных пластических деформаций под вторым роликом перераспределяется в поперечном направлении и для компенсации продольной усадки от сварки необходима большая степень деформации по высоте очага. Нереализованное удлинение металла на отрезке между роликами вызывает также перераспределение пластических деформаций под первым роликом. О перераспределении металла в поперечном направлении свидетельствуют измерения твердости, распределение продольных остаточных напряжений, улучшение прочностных характеристик, а также результаты рентгеновского и электронномикроскопического исследований. В случае КП структура мелкокристаллическая со слабой негомогенностью при незначительном наклепе не только в шве, но и в зоне сплавления. На контрольных же образцах рефлекс крупные, размытые дуплета значительное. Сопоставление рентгенограмм указывает также на то, что остаточные напряжения второго ро-

на
лауобразцах, сваренных с применением КП, ниже по сравнению с исходным состоянием.

В г л а в е 4 рассматривается численное определение температурных полей при совмещенных процессах сварки и прокатки. Ввиду того, что деформирование осуществляется в различных температурных зонах, подход к определению температур заложен разный. В высокотемпературной зоне необходимая точность получена численным решением уравнения теплопроводности вида:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{(T)} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + V c \delta_{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} + q_u(x, y) - q_c(x - L, y) - b_{(T)} = 0,$$

где q_u, q_c - удельные мощности сварочного источника и стока теплоты соответственно с координатами X, Y и $X - L, Y$; b - удельная мощность поверхностной теплоотдачи; $\lambda, c \delta$ - теплопроводность и объемная теплоемкость металла; T - температура точек пластины.

При постановке и решении задачи сделаны допущения:

1. Рассматривается температурное поле предельного состояния;
2. Теплоотдача в зоне прокатки складывается из теплоотдачи в ролик и подкладку;
3. Контакт ролика с металлом и металла с подкладкой идеальный;
4. Зависимости теплопроводности, объемной теплоемкости и коэффициента черноты от температуры представлены в виде кусочно-линейной аппроксимации.

Сварочный источник и сток теплоты заданы в уравнении из предположения нормального характера их распределения:

$$q_{u(x,y)} = \frac{3}{\pi \delta} \frac{q_0}{R^2} \exp \left\{ -\frac{3}{R^2} [(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2] \right\},$$

$$q_{c(x-L,y)} = \left[\frac{k_p}{\delta} (T - T_p) + \frac{R_n}{\delta} (T - T_n) \right] \exp \left\{ -\frac{R[(x-L)^2 + (y_0 - y)^2]}{(x-L)^2 + (y_0 - y)^2} \right\},$$

где q_0 - мощность сварочного источника; q_c - эффективная мощность стока теплоты в ролик и подкладку; δ - толщина пластины; R - радиус активного пятна нагрева; x_0, y_0 - координаты источника; R_p, R_n - эффективные коэффициенты теплоотдачи в ролик и подкладку; T_p, T_n - температуры металла в зоне прокатки, прокатного ролика и подкладки.

Отличительная особенность рассматриваемой задачи состоит в том, что решение задачи разбивается на несколько этапов. Первоначально с использованием классического решения, полученного методом источников, находится начальное температурное поле, которое является исходным для расчета уточненных температур по дифферен-

циальному уравнению теплопроводности. По результатам его решения определяются координаты стока (место установки прокатного ролика). На втором и последующих этапах производится уточнение положения ролика относительно источника ввода энергии с учетом отвода теплоты в ролик и подкладку.

Решение дифференциального уравнения выполняется методом конечных разностей, в основу которого положен высокоэффективный итерационный процесс. Для реализации его высокотемпературную область разбивают на прямоугольные элементы с размерами ΔX , ΔY , а дифференциальное уравнение преобразуется в систему алгебраических уравнений путем замены частных производных конечно-разностными приращениями.

Для организации вычислительного процесса разработан алгоритм и составлены программы по определению температурных полей при ВТП стыковых сварных соединений из сплава ВТІ-І и стали І2ХІ8НІ0Т и КІ сплава В92. Анализ температурных полей с применением прокатки в высокотемпературной области и без прокатки свидетельствует о том, что с наложением стоков теплоты результирующее температурное поле видоизменяется. Это проявляется на термических циклах для точек, проходящих через очаг деформации не только местным, но и общим увеличением градиента температур позади ролика на всей ширине зоны прокатки. Степень переохлаждения деформированного металла растет с уменьшением скорости сварки, увеличением теплопроводности ролика, его диаметра и степени деформации.

Следовательно, изменяя параметры деформирования, режим сварки, материал ролика, условия его охлаждения, можно в широких пределах регулировать термический цикл сварки, время пребывания металла в области высоких температур и тем самым направленно влиять на свойства сварного соединения. Это хорошо согласуется с результатами испытаний и эксплуатационными характеристиками изделий, сваренных с прокаткой. Сопоставление расчетных термических циклов с экспериментальными позволило сделать вывод, что предложенные физические и математические модели реально отражают тепловые процессы, протекающие при высокотемпературной и горячей прокатке в процессе сварки.

Результирующее температурное поле в низкотемпературной области находится путем суммирования температурных полей, определенных аналитически от источника теплоты и двух стоков, расположенных в местах осуществления горячей и холодной деформации.

Значительная удаленность низкотемпературной области от места ввода источника и основного отбора теплоты, приходящегося на место установки первого ролика, позволяет с высокой точностью определять температурное поле, используя формулу Н.Н.Ракалина для точечного быстро движущегося источника в пластине.

Глава 5 посвящена расчетному определению основных технологических параметров деформирования. К ним относятся: усилие прокатки, расстояние до места приложения деформирующих усилий относительно источника ввода энергии; высота усиления шва; диаметр прокатных роликов.

Усилие прокатки (Р). Усилие на ролик определяет моменты, мощность, расход энергии при прокатке, жесткость деталей прокатной головки и воспринимающих нагрузку сварочных устройств и приспособлений. При прокатке узкими роликами, металл под роликом воспринимает сопротивление материала деформированию не только в зоне нагружения, но и со стороны внешних зон (продольных и боковых), т.е. задача о прокатке шва представляет собой задачу о прокатке полосы, нагруженной по контуру внешними силами. Решение подобных задач в теории пластичности разработано только в общем виде. Наиболее полно решены задачи без нагрузок по внешнему контуру.

В данной работе задача о прокатке шва рассматривается как задача о прокатке полосы, но с учетом внешних зон, сварочных напряжений и температурно-скоростных условий деформирования. Полное усилие металла на ролик P определяется произведением среднего удельного давления в очаге деформации $P_{ср}$ на площадь контакта металла под роликом и на коэффициенты n'_σ и n''_σ , которые учитывают соответственно действие продольных, боковых внешних зон и влияние сварочных напряжений, т.е. $P = P_{ср} \cdot S \cdot n'_\sigma \cdot n''_\sigma$. Значения n'_σ и n''_σ определены экспериментально и представлены в виде следующих выражений:

$n'_\sigma = 1 - 6\alpha_{г\max} / (36\tau)$, $n''_\sigma = 2,57 \sqrt{2dh_{оп} \varepsilon_z} / [h_{ор}(2 - \varepsilon_z)]^{0,4}$
 где $h_{оп}$ — расчетная толщина материала в зоне прокатки. При двухсторонней прокатке $h_{ор} = h_o$; при односторонней — $h_{ор} = 2h_o$.

Величины $P_{ср}$ и S находятся посредством решения нелинейного дифференциального уравнения контактных напряжений вида:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2 - \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4h}{2h_x}\right)^2 = \frac{4\tau^2}{h_x^2}$$

В зависимости от направления течения металла в очаге деформации, очаг разбит на три зоны: опережения, торможения и уширения.

Решение дифференциального уравнения сведено к поиску минимума некоторого функционала и нахождению экстремалей из уравнения Эйлера путем применения модифицированного преобразования Лежандра. Полученные выражения позволили получить распределение контактных напряжений по каждой зоне очага деформации.

$$\text{В зоне опережения } P_{0(x)} = \left(1 + \frac{4\epsilon_s \ell}{\Delta h}\right) \epsilon_n \frac{h_x}{h_1} + 2\epsilon_s,$$

$$\text{В зоне торможения } P_{T(x)} = \left(1 - \frac{4\epsilon_s \ell}{\Delta h}\right) \epsilon_n \frac{h_x}{h_0} + 2\epsilon_s.$$

В зоне уширения

$$P_{y(x,y)} = \epsilon_n \frac{h_x}{n_0} + 2\epsilon_s \left(1 - \frac{2\ell}{\Delta h}\right) \epsilon_n \left\{ \frac{\Delta h(y - \frac{\delta}{2})}{2\ell h_x} + \sqrt{1 + \frac{\Delta h^2(y - \frac{\delta}{2})^2}{4\ell^2 h_x^2}} \right\}$$

На основе равенства напряжений на границах найдены линии раздела зон, а путем интегрирования по контуру удельных нагрузок получены выражения для расчета их площадей:

$$S_0 = 2 \left[\left(\frac{\delta}{2} + \frac{\delta h_1}{\Delta h} \right) x_n - \frac{\ell^2 (h_n^3 - h_1^3)}{3 \Delta h^2 h_1} \right],$$

$$S_T = 2 \left[\left(\frac{\delta}{2} - \frac{\ell h_0}{\Delta h} \right) (\ell - x_n) + \frac{\ell^2 (h_0^3 - h_n^3)}{3 \Delta h^2 h_0} \right],$$

$$S_4 = 2 \left[\frac{\ell^2 h_0}{\Delta h} \frac{\ell^2}{3 \Delta h^2} \left(\frac{h_n^3 - h_1^3}{n_1} - \frac{h_0^3 - h_n^3}{n_0} \right) - \ell x_n \right], \quad S = S_0 + S_T + S_4,$$

где $x_n = [\ell(h_0 h_1 - h_1^2)] / \delta h$ — координаты нейтрального сечения очага деформации (сечение, в котором касательное напряжение меняет свой знак); $\ell = \sqrt{\delta h_0 \rho \epsilon_2}$ — длина очага деформации; δ — ширина очага деформации (в исходном состоянии равна ширине шва); d — диаметр прокатного ролика.

Среднее удельное давление для всей контактной поверхности ролика с металлом определяется по уравнению:

$$P_{cp} = \frac{1}{S} \left(\iint_{S_0} P_0 dx dy + \iint_{S_T} P_T dx dy + \iint_{S_4} P_y dx dy \right)$$

При определении среднего удельного давления значения касательного напряжения ϵ_s , входящее в формулы по определению контактных напряжений по различным зонам, находили с учетом влияния температурно-скоростных факторов на сопротивление материала деформированию. Применительно к рассматриваемым материалам и толщинам в работе приведены оптимальные усилия прокатки. Рассчитанные значения усилий, особенно для III и IV хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонения для этих процессов составляют не более 5%, а для ВТП — 8%.

Расстояние до места положения ролика относительно ввода энергии (L), определяет температурные условия деформирования. Смещение ролика относительно оптимального расстояния в направлении сварочной горелки или от неё отрицательно сказывается на характеристиках сварного соединения. Наибольшая точность при установке ролика требуется при ВП. Для горячей, а особенно холодной прокатки требования по определению расстояния в связи с уменьшением градиента температур по длине шва снижаются. В высокотемпературной зоне требуемая точность достигается решением дифференциального уравнения теплопроводности (см. гл. 4). Кроме этого, для ВП L_B может быть получено из условия качественного формирования сварного соединения, которое достигается, если расплавленный металл в хвостовой части сварочной ванны не выходит за ось ролика и при этом закатывается оптимальное усиление шва заподлицо с основным материалом. Математически эти условия представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} L_B = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3 \\ h_p + h_n = \delta_k + (h_w + \delta)(1 - \varepsilon_2), \end{cases}$$

из которого методом последовательных приближений с учетом ранее полученных выражений для определения ℓ_1 , ℓ_2 , ℓ_3 и h_n , h_p (см. гл. 3) находятся оптимальные значения L_B .

Для горячей, теплой или холодной прокатки соответствующие расстояния L_r , L_T и L_x могут быть определены из выражений:

$$T_r = T_{Hr} - \Delta T_{Cr} + \Delta T_{пл}, \quad T_T = T_{HT} - \Delta T_{CT},$$

где T_{Hr} , T_{HT} — температуры от сварочного источника на расстояниях L_r и L_T без прокатки; ΔT_{Cr} , ΔT_{CT} — переохлаждение материала в месте установки ролика для горячей и теплой прокатки; $\Delta T_{пл}$ — повышение температуры от пластической деформации.

Значения T_{Hr} , T_{HT} находятся и использованием метода источников и формул мощного быстродействующего источника в пластине. При вычислении переохлаждения принимается допущение, что контакт ролика с металлом и металла с подкладкой идеальный. В работе приведены конечные формулы и графики по определению L_B , L_r и L_x для оптимальных режимов деформирования. Оценка достоверности расчетных значений расстояний от места ввода энергии до оси прокатного ролика путем сопоставления их с экспериментальными данными свидетельствует о том, что предложенные математические модели адекватно отражают реальные процессы.

Диаметр прокатного ролика (d). Важным технологическим

параметром как с энергетической, так и с деформационной точек зрения, является диаметр прокатного ролика. Завышение его размера приводит к необходимости увеличения усилия прокатки, жесткости деформирующего и воспринимающего нагрузку устройств. Снижение диаметра прокатного ролика вызывает неравномерность распределения пластических деформаций и напряжений по толщине прокатываемого материала, а при его чрезмерном уменьшении пластическая деформация возникает только в приконтактных зонах.

Для XII, использующей относительно небольшие степени деформации ($\epsilon_z < 3+4\%$), достаточным условием при назначении диаметра ролика является условие распространения пластической деформации на всю толщину прокатываемого материала. Применительно к односторонней XII это условие достигается при минимальном диаметре прокатного ролика, равном

$$d_{ix \min} = 0,0125 h_0 (2 - \epsilon_z)^2 / \epsilon_z$$

В случае XII по схеме "ролик-ролик":

$$d_{2x \min} = 0,5 d_{ix \min}$$

Для III условие распространения пластической деформации на всю толщину материала является недостаточным. Необходимо также выполнить условие, препятствующее возникновению в металле со стороны подкладки продольных растягивающих напряжений, превышающих 0,3 σ_T материала в состоянии прокатки. Это для односторонней III выполняется тогда, когда отношение средней высоты очага деформации к его длине не превышает 0,75. В соответствии с этим минимальный диаметр прокатного ролика для III по схеме "ролик-подкладка" рассчитывается по выражению:

$$d_{r \min} = 0,248 h_0 (2 - \epsilon_z)^2 / \epsilon_z$$

При ВТП давление роликом создается на жидкий металл, которое вне зависимости от диаметра ролика передается равномерно по всем направлениям. Поэтому при выборе диаметра ролика необходимо руководствоваться соображениями возможности осуществления самого процесса, что определяется протяженностью сварочной ванны, и как следствие этого, расстоянием от оси электрода до места приложения деформирующего усилия. При известных значениях L_B , диаметре электрода $d_{эл}$ максимальный диаметр прокатного ролика для ВТП определяется $d_{B \max} = 2(L_B - d_{эл}) - \Delta$, где Δ - зазор между роликом и электродом.

Усиление шва (h_{III}). Эффективность рассмотренных способов прокатки во многом определяется степенью заглаживания усиления

шва. Наибольшее влияние на характеристики сварного соединения (предел прочности, коррозионную стойкость, ударную вязкость, деформируемость и др.) достигается при полном заглаживании оптимальных усилений шва заподлицо с основным материалом. Поэтому усиление шва $h_{ш}$ следует назначать, исходя из изменения свойств сварного соединения после обработки.

При выполнении ВТП таким критерием может быть эффективность правки. Отклонения $h_{ш}$ от оптимальных значений существенно снижают эффективность правки при ВТП. За оптимальные $h_{ш_0}$ приняты те значения усиления шва, при которых деформируемость сварного соединения уменьшается более чем на 70%, что соответствует максимальной эффективности большинства применяемых способов устранения перемещений. В работе получены аппроксимирующие зависимости $h_{ш} = f(\delta)$, которые применительно к рассматриваемым материалам имеют вид:

$$\text{для стали 12Х18Н10Т} - h_{ш_D} = 0,0236 \delta^2 - 0,116 \delta + 0,773;$$

$$\text{для сплава ВТИ-I} - h_{ш_D} = 0,0283 \delta^2 - 0,13 \delta + 0,777.$$

При выполнении ГП в процессе сварки таким критерием является диапазон степеней горячей деформации, который обеспечивает высокие характеристики сварного соединения. Внутри этого диапазона $h_{ш_G} = \delta \epsilon_{2r} / (1 - \epsilon_{2r})$,

где ϵ_{2r} — среднее арифметическое значение степени горячей деформации из диапазона оптимальных значений.

В случае КП в процессе сварки, кроме высоких характеристик сварного соединения, закатка усиления шва заподлицо с основным материалом должна обеспечивать и компенсацию сварочных деформаций. Это достигается, когда

$$h_{ш_k} = \frac{\delta [\epsilon_{2r} + \epsilon_{2x} (1 - \epsilon_{2x})]}{(1 - \epsilon_{2r})(1 - \epsilon_{2x})},$$

где ϵ_{2x} — степень холодной деформации.

Глава 6 посвящена вопросам реализации, оценке эффективности и области применения деформационно-технологических методов повышения работоспособности сварных тонкостенных конструкций в промышленности.

Промышленное применение методов потребовало решения ряда технологических вопросов. К их числу следует отнести оценку влияния прокатки на изменения параметров режима сварки, стабильность характеристик механических свойств после прокатки, возможности использования прокатки для устранения дефектов внешнего

формирования шва, разработку оборудования и оснастки, предназначенных для реализации предлагаемых технических решений.

Выполнение сварки с прокаткой сопровождается стоком части тепловой энергии в ролик и подкладку. Установлено, что большая часть этой энергии не влияет на проплавляющую способность дуги. Это подтверждается анализом макроструктуры, показывающим, что полное проплавление сварного соединения при сварке с ВП и П достигается за счет увеличения мощности дуги не более чем на 3-5%. Относительно небольшое уменьшение проплавляющей мощности дуги объясняется тем, что при сварке с ВП отбор теплоты идет с хвостовой части сварочной ванны, а при П с уже закристаллизовавшегося металла. Идентичность изменения глубины проплавления сварки связано с тем, что больший отбор теплоты при ВП на сплаве ВТ-1 и стали 12Х18Н10Т компенсируется при выполнении П высокой теплопроводностью алюминиевых сплавов АМгС в В92.

Другим важным фактором промышленного применения способов местного пластического деформирования является высокая стабильность механических характеристик сварного соединения, прошедших сварку с прокаткой на оптимальных параметрах деформирования. Применение прокатки в процессе сварки уменьшает как дисперсию, так и среднее квадратичное отклонение отдельных результатов испытаний от генеральной совокупности. Причем, средние арифметические значения σ_B и $\sigma_{\perp}$ после сварки по предлагаемой технологии существенно выше этих же величин по сравнению с существующей технологией.

Уменьшение дисперсия σ_B и $\sigma_{\perp}$ происходит в результате того, что после обработки шов приобретает мелкозернистую структуру и, кроме этого, оказывается положительное воздействие в процессе прокатки на зону сплавления, являющуюся при существующих технологических процессах зоной слабости.

Одновременно с увеличением стабильности характеристик сварного соединения ВП и П в процессе сварки позволяют значительно повысить и несущую способность сварных конструкций, работающих при знакопеременных нагрузках. Последнее достигается тем, что в процессе обработки усиление шва закатывается заподлицо с основным материалом. В тех случаях, когда требуется удалить и проплав, предложен и практически осуществлен способ высокотемпературной деформации последовательно с двух сторон, с обеспечением глубины проплавления при первом проходе 0,65±0,6 а при втором 0,5±0,4 толщины основного материала.

Проведенные исследования позволили создать и новые технологические процессы по устранению сварочных деформаций и перемещений после выполнения сварки. К ним следует отнести применение прокатки для правки тонкостенных конструкций с круговыми швами, а также для правки балочных конструкций таврового профиля.

Контроль качества сварки с прокаткой с высокой достоверностью может осуществляться разрушающими способами контроля, а для выявления наружных дефектов путем применения внешнего осмотра или люминесцентного метода. Для применения радиационных видов контроля, а также ультразвукового контроля, требуется проведение дополнительных исследований по оценке достоверности этих способов контроля, так как пластическое деформирование, уменьшая вероятность образования дефектов, вносит изменения в форму дефекта, их размеры и ориентацию в шве, т.е. изменяет всю картину дефектности в целом.

Применение способов местного пластического деформирования возможно на широкой номенклатуре тонколистовых и тонкостенных конструкций, использующих при своем изготовлении автоматическую сварку в среде защитных газов. При этом холодная прокатка в процессе однопроводной сварки практически осуществима для различных материалов и толщин. Ограничением для использования ХП может быть только недостаточная жесткость сварочного оборудования. Горячая, а особенно ВТП, могут быть реализованы с определенной, различной для каждого материала толщиной. Это связано с физической возможностью осуществления пластического воздействия на металл шва в соответствующей температурной зоне, удаленность которой от места ввода энергии определяется теплофизическими свойствами материала, его толщиной и погонной энергией сварки. Для скоростей сварки от 18 до 36 м/ч, как наиболее широко используемого в промышленности диапазона скоростей, область применения ВТП и ГП представлена в виде диаграммы (рис. 3).

Для реализации новых технологических процессов, включающих в себя сварку и прокатку, разработаны и изготовлены ряд специализированных установок и созданы деформирующие устройства, которые могут быть непосредственно встроены в существующие промышленные установки.

Разработанные руководящие материалы, технологические процессы, оборудование и оснастка внедрены на ряде предприятий г. Омска, г. Красноярска и г. Калуги.

Подробно прикладные результаты работы освещены в публикациях в периодической и специальной литературе и отражены в упомянутом разделе диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ путей повышения работоспособности сварных тонкостенных конструкций из АЭ ($\delta = 2-10$ мм), Ti сплавов и аустенитной стали ($\delta = 0,6-5$ мм), изготовленных с применением автоматической дуговой сварки в среде защитных газов выявил следующие направления: металлургическое, конструкторское, технологическое и деформационно-технологическое.

Экспериментально показано, что наиболее перспективным из них является деформационное воздействие на зону соединения путем прокатки металла шва вслед за дугой.

2. Теоретически путем решения дифференциального уравнения теплопроводности установлено, что при совмещенных процессах сварки и прокатки температурное поле видоизменяется за счет интенсификации оттока теплоты в подкладку и дополнительного стока в прокатный ролик.

Установлено, что изменяя материал ролика, подкладки, их температуру в зоне контакта со свариваемым материалом возможно в широком диапазоне регулирование термического цикла сварки.

3. Показано, что в зависимости от температурного диапазона деформирования способы односторонней прокатки целесообразно разделять на:

- высокотемпературную в диапазоне $T_d - T_c$;
- горячую в диапазоне $(0,55 \pm 0,7) T_{пл}$;
- теплую в диапазоне $(0,35 \pm 0,5) T_{пл}$;
- холодную при температурах ниже $0,3 T_{пл}$;
- комбинированную, являющуюся комбинацией двух и более способов и осуществляющих воздействие на металл шва одновременно.

Для рассматриваемых толщин и скоростей сварки более 15 м/ч высокотемпературная и комбинированная (ВП + КП) прокатки могут быть реализованы применительно к Ti сплавам и аустенитной стали типа 12Х18Н10Т, а горячая и комбинированная (ГП + КП) прокатки - для алюминиевых сплавов.

4. При холодной и в нижнем интервале температурного диапазона тепловой прокатки основным параметром деформирования является

степень деформации.

Оптимальные значения этого параметра могут быть определены экспериментально, а также на основе математической модели, устанавливающей взаимосвязь степени деформации с условиями и характером течения металла под роликом.

Расчетами установлено, что, изменяя размеры очага деформации, шероховатость контактных поверхностей, знак напряжений в зоне прокатки, можно видоизменять направленность течения металла под роликом от преимущественно продольного на поперечное и тем самым управлять степенью воздействия на околосшовную зону, что особенно важно при сварке материалов с широкой зоной термического влияния, как, например, у алюминиевых сплавов.

Проведенные сопоставления показали, что экспериментальные значения не противоречат результатам, полученным аналитически.

5. При горячей и высокотемпературной прокатке основными параметрами являются температура деформирования и степень деформации.

Их оптимальные значения определяются экспериментально.

Применительно к высокотемпературной прокатке параметры деформирования находятся из условий значительного повышения пластических показателей сварного соединения, снижения более чем на 70% перемещений тонкостенных конструкций, уменьшения пористости и формирования за счет дополнительного переохлаждения сварочной ванны и дробления уже сформировавшихся кристаллитов однородной мелкозернистой структуры по всему сечению шва. Это достигается в том случае, если кристаллизация металла шва происходит под давлением и степень деформации по толщине при полном заглаживании усиления шва заподлицо с основным материалом превышает 10-12%.

Устранение сварочных перемещений связано со снижением неравномерности распределения пластических деформаций укорочения по толщине материала и предотвращения возможности деформации стыкуемых кромок в результате их гарантированного поджатия к подкладке. При прочих равных условиях эффективность устранения перемещений при сварке аустенитной стали выше, чем при сварке аналогичных толщин Ti сплавов.

При горячей прокатке образование дисперсной структуры по всему сечению шва, обеспечивающей улучшение свойств сварных соединений, особенно их пластических показателей, ударной вязкости достигается при $\varepsilon_2 > 7-8\%$. Измельчение структуры в этом случае

идет только за счет дробления первичных кристаллов.

6. В отличие от высокотемпературной и горячей прокатки комбинированная прокатка наряду с повышением механических характеристик сварного соединения обеспечивает и устранение сварочных деформаций и остаточных напряжений. Эффективность комплексного воздействия на сварное соединение возрастает, если комбинированную прокатку осуществлять в жесткой обойме, которая из-за сдерживания деформаций в продольном направлении вызывает перераспределение части продольной пластической деформации под первым и вторым роликками в поперечную.

7. Оптимальные размеры роlikов в рассматриваемых температурных диапазонах деформирования должны назначаться:

при холодной прокатке - из условия распространения пластической деформации по всей толщине прокатываемого материала, что достигается, когда отношение среднего размера высоты металла в очаге деформации к его длине при двухсторонней прокатке не превышает 8,75, а при односторонней прокатке - 4,25;

при горячей прокатке - минимальным уровнем растягивающих напряжений создаваемых в очаге деформации, который не должен превышать $0,3\sigma_T$ основного материала при температуре прокатки. Это возможно, если отношение средней высоты очага деформации к его длине при двухсторонней прокатке меньше 1,25, а при односторонней 0,7;

при высокотемпературной прокатке - возможностью осуществления самого процесса, что определяется протяженностью сварочной ванны, материалами ролика, подкладки и условиями их охлаждения.

8. Созданные математические модели совмещенных процессов сварки и прокатки позволяют для рассматриваемых толщин, материала и способов сварки определять в условиях местной деформации, сварочных напряжений, переменных температур технологические параметры деформирования: усилия прокатки, расстояния приложения усилия от места ввода тепловой энергии, степень деформации, необходимую для устранения сварочных перемещений и величину общего усиления шва из условия заглаживания его заподлицо с основным материалом.

9. Исследования сложных, одновременно протекающих процессов сварки и прокатки металла в различных температурных зонах, позволили создать новые технологические процессы, защищенные авторскими свидетельствами и разработать средства для их реализации.

Элементы теории, оборудование и оснастка для осуществления

воздействия на оварное соединение с целью повышения работоспособности сварных конструкций опробованы, внедрены в производство, учебный процесс на ряде предприятий и организаций разных ведомств с общим экономическим эффектом свыше 900 тыс. рублей.

Основные результаты работы отражены в следующих работах:

1. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф. Высокоскоростное пульсирующее деформирование как метод снятия напряжений и устранения деформаций//Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций.-М.:Машиностроение, 1969.-С.105-110.

2. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф. Устранение сварочных напряжений и деформаций в конструкциях из магниевых и алюминиевых сплавов высокоскоростной проковкой//Технология, организация и механизация сварочного производства (НИИИНФОРМТЯМАШ).-1971.-№2.-С.28-44.

3. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф., Милехин Е.С. Сварочные деформации и напряжения в конструкциях из алюминиевых сплавов//Технология, организация и механизация сварочного производства (НИИИНФОРМТЯМАШ).-1971.-№9.-43 с.

4. Кондаков Г.Ф., Сагалевич В.М. Устранение деформаций и напряжений в тонкостенных конструкциях из титановых сплавов путем пластического деформирования металла шва//Разработка и внедрение прогрессивных методов сварки и изготовление сварных изделий на предприятии машиностроения:Тез.докл.науч.тех.конф.-Омск, 1973.-С.221-228.

5. Кондаков Г.Ф. Влияние скорости нагружения на величину остаточных напряжений//Совершенствование конструкции наземного оборудования:Сб.науч.работ.-Омск, 1972.-С.40-44.

6. А.С. 336373 СССР, МКИ³ с22 I/04. Способ термомеханической обработки сварных соединений/ Е.Г.Антонов, Г.Ф.Кондаков, Е.С.Милехин, Б.Н.Морозов, В.М.Сагалевич.-Опубл.21.04.72, Бюл.№14.

7. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф. Тепловые процессы при высокоскоростной проковке сварных швов//Технология изготовления заготовок в машиностроении.-М.:Машиностроение, 1971.-С.109-122.

8. Кондаков Г.Ф., Мартынов А.Н. Пути повышения качества сварных соединений из алюминиевых сплавов AlMg6 и 1920//Тез. докл. I Всесоз.конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов.-Хив, 1978.-С.51.

9. Кондаков Г.Ф., Засильченко В.Г. Исследование процесса высокотемпературной деформации алюминиевых сплавов//Эффектив-
28

ность использования технических средств в вузах РСФСР: Патер. науч. метод. конф. - Новосибирск, 1976. - С. 50.

10. Кондаков Г.Ф., Васильченко В.Г. Высокотемпературная обработка сварных швов // Технология, организация и механизация сварочного производства (НИИИНФОРМТЯМАШ). - 1977. - №15. - С. 13-17.

11. Кондаков Г.Ф., Мартынов А.Н., Мальцев М.В. Влияние некоторых технологических факторов на свойства сварных соединений сплава В92 // Там же. - С. 5-13.

12. Кондаков Г.Ф., Русаков Е.Л. Дуговая сварка тонкостенных конструкций с прокаткой кристаллизующегося металла // Прочность и технология изготовления сварных конструкций: Тез. докл. Всесоюз. науч. тех. конф. - М., 1983. - С. 79-81.

13. А.С. 1057215 СССР, МКГ³ В23 к 9/16. Способ дуговой сварки. / Г.Ф. Кондаков, В.И. Сагалевич, М.В. Петровский, Р.И. Утляев. - Опусл. 30.11.83, Бюл. 144.

14. Кондаков Г.Ф., Орлик Г.В., Сивачев Р.Р. Применение высокотемпературной прокатки в среде защитных газов // ИСС-летние изобретения сварки по методу Н.Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства: Тез. докл. Всесоюз. науч. тех. конф. - Пермь, 1988. - Ч. 3. - С. 54-55.

15. Кондаков Г.Ф. Высокотемпературная прокатка в процессе сварки стыковых соединений // Сварочное производство. - 1987. - №5. - С. 1-3.

16. Татаринцов В.П., Сагалевич В.И., Мезенцева С.А., Кондаков Г.Ф. Напряженно-деформационное состояние сварного соединения при обкатке и сварке // Технология, организация и механизация сварочного производства (НИИИНФОРМТЯМАШ). - 1979. - №18. - С. 26-32.

17. Кондаков Г.Ф., Мартынов А.И. Горячая прокатка сварных соединений из алюминиевых сплавов AlMg6 и В92 // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. - Киев: Наукова думка, 1980. - С. 272-277.

18. Кондаков Г.Ф., Мартынов А.Н. Формирование соединения при дуговой сварке с наложением принудительного давления // Развитие электродуговой сварки и резки металлов в СССР. - Киев: Наукова думка, 1982. - С. 103-110.

19. А.С. 1574408 СССР, МКГ³ В23 к 28/00. Способ изготовления сварных соединений / Г.Ф. Кондаков, А.И. Мартынов. - Опусл. 30.06.90. Бюл. 124.

20. Кондаков Г.Ф. Влияние способов местного деформирова-

ния на величину остаточных напряжений и свойства сварного соединения//Сварочное производство.-1988.-№5.-С.18-20.

21. Кондаков Г.Ф., Петренко И.П. Определение температурного поля при местном деформировании в процессе сварки//Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машино- и приборостроении:Тез. докл. науч. тех. конф.-Калуга, 1990.-С.30.

22. Кондаков Г.Ф., Андриянов Г.И. Математическая модель по определению усилия при двусторонней прокатке//Автоматизация исследований, проектирование и испытание сложных технических систем:Тез. докл. Всесоюз. науч. тех. конф.-Калуга, 1989.-С.225.

23. Кондаков Г.Ф. Расчетное определение оптимального расстояния ролика относительно электрода при высокотемпературной прокатке стыковых сварных соединений// Там же .-С.224.

24. Кондаков Г.Ф., Иваненко А.И., Эстеркин Д.Н. Устранение сварочных деформаций в конструкциях таврового профиля//Сварочное производство.-1986.-№1.-с.39-40.

25. Кондаков Г.Ф. Определение параметров режима прокатки стыковых сварных соединений//Прогрессивные технологии в машиностроении и приборостроении:Труды ИТТУ им.Н.Э.Баумана.-1989.-№528.-С.85-106.

26. Кондаков Г.Ф. Определение усилий при прокатке прямолинейных стыковых швов//Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве:Тез. докл. Всесоюз. науч. техн. конф.-Челябинск, 1986.-С.314-315.

27. Кондаков Г.Ф. Расчетное определение усилия при высокотемпературной прокатке шва//Современные проблемы технологии машиностроения:Тез. докл. Всесоюз. науч. техн. конф.-М., 1986.-С.93-94.

28. Кондаков Г.Ф. Вопросы применения прокатки сварного соединения роликами//Технологические остаточные напряжения: Материалы III Всесоюз. симпозиума.-М.-Кутаиси, 1988.-С.225-229.

29. А.С. СССР 1537433, МПК³ В23 К9/16, 28/00. Способ дуговой сварки/Г.Ф.Кондаков, Г.В.Орлик, Н.И.Никитин, С.С.Адамчук, Н.Э.Ганцерж.-Опубл. 23.01.90. Бюл.МЗ.

30. Первозчиков С.Г., Зитушлин В.С., Кондаков Г.Ф., Созинов А.И. Математические модели и автоматизированное управление прогрессивными технологическими процессами//Материалы докл. на 38 International Wissenschaftliches Kolloquium.-Hannau, 30

33. Кондаков Г.Ф. Уменьшение пористости при дуговой сварке стевовых соединений из титановых сплавов//Междузовский сборник научных трудов. - М., 1992. - С.114-119.

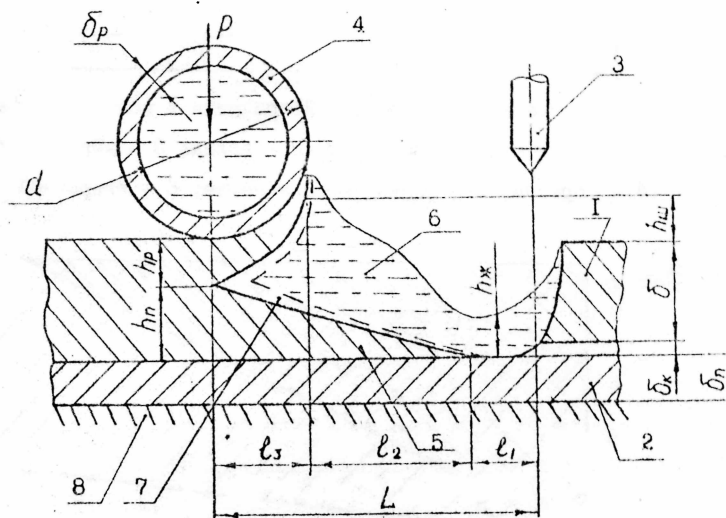


Рис. 1. Схема формирования соединения по оси шва при высокотемпературной прокатке в процессе сварки.

1 - свариваемый материал; 2 - формирующая подкладка;
3 - электрод; 4 - прокатной ролик; 5 - закристаллизовавшийся металл; 6 - жидкий металл; 7 - двухфазная область;
8 - сварочный стол.

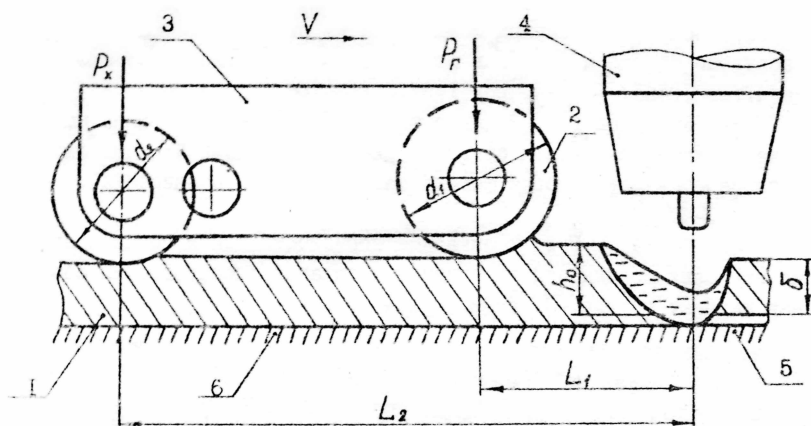


Рис. 2. Схема комбинированной прокатки в жёсткой обойме.

1 - прокатываемый материал; 2 - ролик; 3 - жёсткая обойма;
4 - горелка; 5 - формирующая канавка; 6 - сварочный стол

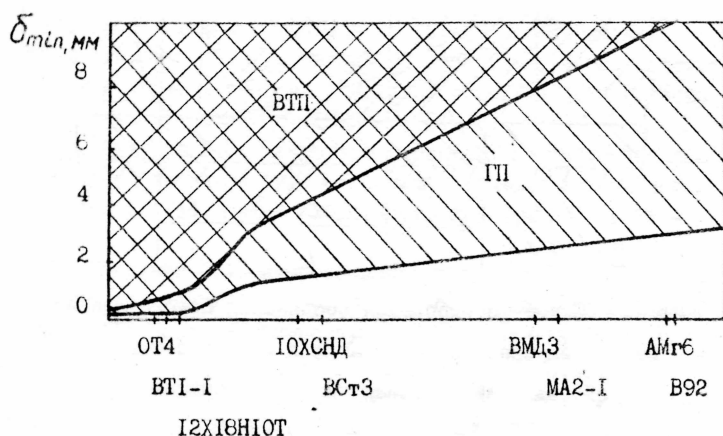


Рис. 3. Области применения высокотемпературной и горячей прокатки в процессе сварки.