

04174650

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Аспирант МАГЕРРАМОВ А. Г.

**ВЛИЯНИЕ СОПУТСТВУЮЩЕГО ПОДОГРЕВА
НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННИХ
НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ**

(05.167 — Машины и технология сварочного производства)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —

д. т. н., профессор Н. Н. Прохоров.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Г. Д. Никифоров,

кандидат технических наук Г. А. Славин

Ведущее предприятие: ВИАМ.

Автореферат разослан « . . . » 1972 г.

Защита диссертации состоится « . . . » 1972 г.

на заседании Совета факультета «Автоматизации и механизации производства», МВТУ им. Н. Э. Баумана, 107005, г. Москва, 2-я Бауманская 5

С диссе-
им. Н. Э.

ке МВТУ

Ваши
ренные пе

ах, заве-
адресу.

Ученый

к. т. н.

Степанов

1174650

ВВЕДЕНИЕ

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР отмечается необходимость ускоренного развития специализированных мощностей по производству сварных конструкций, которые в общесоюзной структуре металлических заготовок составляют более 40%. При этом особо подчеркивается возможность повышения работоспособности и надежности сварных конструкций и соединений.

Качество сварных конструкций определяется в основном технологическими и конструктивными решениями, которые принимаются при их изготовлении и проектировании.

Как известно, за счет локального интенсивного теплового воздействия при сварке возникает внутренние напряжения и деформации, которые в ряде случаев могут оказать отрицательное влияние на прочность, коррозионную стойкость и точность сварной конструкции.

Еще Н.Г.Славянов в своих работах в 1892 году писал об опасности "вредных напряжений в металлах", возникающих при сварке и указывал, что эти напряжения могут быть изменены в широких пределах и техника должна указать надежные и верные пути по управлению этими напряжениями.

Полностью исключить появление сварочных напряжений и деформаций невозможно, однако их уровень можно значительно снизить, управляя ими в процессе изготовления конструкции.

В современной сварочной технике с целью уменьшения энергии внутренних напряжений применяют различные конструктивные и технологические мероприятия. Однако, только научно обоснованное применение методов устранения внутренних напряжений и деформаций может позволить, с одной стороны, экономно изготавливать сварные конструкции, с другой стороны, существенно повысить их качество и надежность. Одним из наиболее эффективных и распространенных методов снижения уровня остаточных напряжений является сопутствующий подогрев.

В связи со сказанным настоящая работа посвящена исследованию механизма влияния сопутствующего подогрева на кинетику развития внутренних напряжений и деформаций при сварке.

Работа состоит из 5 глав и общих выводов, содержит 164 страницы печатного текста, 37 иллюстраций и 9 таблиц, список литературы из 76 наименований.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М ВТУ
им. Н. З. Баумана
БИБЛИОТЕКА

НТБ МГТУ им. Н.З.Баумана



1174650

Магерамов А. Г. Влияние с

Глава I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Идея подогрева свариваемых изделий родилась одновременно с изобретением электросварки. В настоящее время сварка широко применяется при производстве сварных конструкций из высокопрочных металлов и сплавов. Во многих случаях для создания требуемого термического режима сварки необходим подогрев сварных соединений.

В современном сварочном производстве по степени локализации подогрев разделяют на общий и местный. По времени действия по отношению к моменту сварки различают предварительный, сопутствующий и последующий подогрев. Наиболее эффективным из этих способов как с технологической, так и с экономической точки зрения является сопутствующий подогрев.

На основании работ Н.Н.Рыкалина, Г.А.Николаева, Н.О.Окерблома, Н.Н.Прохорова, К.В.Любавского, В.Н.Земзина, Г.Б.Талилова, К.В.Багрянского, Г.В.Сутырина, Л.Н.Белова и других авторов можно сделать вывод, что сопутствующий подогрев является весьма распространенным технологическим мероприятием и применяется с целью регулирования процесса кристаллизации, структурных изменений в металле шва и околошовной зоне, уменьшения остаточных напряжений и деформаций, регулирования вероятности образования горячих и холодных трещин и для повышения хрупкой прочности.

Процесс развития внутренних напряжений и деформаций в металлах при сварке определяет как эксплуатационные характеристики, так и технологическую прочность.

Однако данные в этой области весьма ограниченные.

До настоящего времени для многих сплавов не изучена кинетика развития внутренних напряжений и деформаций в зависимости от температуры сопутствующего подогрева, жесткости свариваемых элементов, теплофизических и механических свойств сплавов и т.д.

Во второй части этой главы проведен анализ существующих методов измерения напряжений и деформаций.

Исследования временных напряжений и деформаций экспериментальными методами в условиях сопутствующего подогрева чрезвычайно сложны и дают весьма ограниченную информацию. Однако результаты таких исследований позволяют количественно оценить данные теоретических методов решения подобных задач.

Большое число работ посвящено теоретическому определению временных и остаточных напряжений и деформаций.

Развитие теоретических методов исследования показало, что моделирование процессов, происходящих при сварке позволяет вскрыть основные причины и закономерности сопутствующих явлений. В частности, при оценке влияния сопутствующего подогрева при сварке, теоретический метод может дать информацию о развитии напряжений и деформаций на протяжении всего процесса сварки во всех температурных диапазонах и областях.

В настоящее время в работах Н.Н.Прохорова и Н.Никол.Прохорова, В.А.Винокурова и А.Г.Григорьянца, В.И.Махненко и В.И.Кузнецова и др. изложены алгоритмы, моделирующие термомеханические процессы в металлах при сварке. Очевидно, что эффективность применения каждой математической модели связана как с производительностью расчетов, так и с точностью результатов счета, которая в свою очередь определяется выбранной расчетной схемой. Применимость той или иной расчетной схемы может быть изменена путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

А.С.Орлов, используя численный метод, развитый в работах Н.Н.Прохорова и Н.Никол.Прохорова, исследовал внутренние деформации в технологических пробах из стали Ст.3. Полученные данные свидетельствуют об удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных результатов и подтверждают правомерность использования применявшейся методики для исследования высокотемпературных деформаций металла шва.

На основании проведенного анализа сделан вывод о необходимости решения следующих задач:

1. Экспериментальное исследование влияния T_{Π} (T_{Π} - температура сопутствующего подогрева) на процесс развития сварочных деформаций.
2. Выбор расчетной схемы исследования кинетики деформаций и напряжений при сварке, оценка степени ее достоверности и уточнение исходных данных для расчета на основании экспериментальных.
3. Изучение процессов развития внутренних продольных напряжений, внешних (в дальнейшем деформации формоизменения будем называть внешней деформацией) и внутренних деформаций и темпов деформирования пластин из различных сплавов в зависимости от T_{Π} , режима сварки и жесткости свариваемых элементов.
4. Исследование влияния T_{Π} на первичную структуру металла шва и околосшовной зоны.

Решение поставленных задач позволит изучить влияние T_{Π} на кинетику развития продольных составляющих внутренних напряжений

и деформаций в зависимости от теплофизических и механических свойств сплавов, дать ответ о целесообразности применения сопутствующего подогрева с целью уменьшения внутренних деформаций и напряжений, кривизны пластины и вероятности образования горячих трещин для различных сплавов и на образцах различных размеров и правильно подойти к выбору оптимальной величины $T_{\text{п}}$.

Глава II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПУТСТВУЮЩЕГО ПОДОГРЕВА НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Экспериментальные исследования проводили: во-первых, для получения количественных временных зависимостей прогиба и кривизны пластины, продольных составляющих остаточных внутренних напряжений и деформаций при разных $T_{\text{п}}$ для различных ширин пластин, для сплавов с различными теплофизическими и механическими свойствами, во-вторых, для оценки достоверности полученных расчетных данных и степени пригодности расчетных предпосылок: теплофизических коэффициентов, эффективного к.п.д. дуги, температурных зависимостей механических свойств и гипотезы плоских сечений.

Для исследования влияния сопутствующего подогрева на развитие внутренних напряжений и деформаций при сварке нами выбраны сплавы, существенно различающиеся по своим теплофизическим и механическим свойствам. В качестве таковых были приняты сплавы на основе алюминия (АМц), титана (ВТИ-1), железа (IX18Н9Т) и никеля (нимоник 80А).

Образцы, применявшиеся в исследованиях, имели постоянную длину и различную ширину. При длине образцов в 30,0 см и при толщине их в 1,0 см ширина составляла 2,5; 5,0 и 10 см.

Образцы таких размеров обычно применяются при испытаниях металла технологическими пробами.

Переплавление кромок пластин было принято как основная схема при выявлении закономерностей процесса изменения внутренних напряжений и деформаций в процессе сварки. Эта схема, сохраняя физическую картину процесса, существенно сокращает трудоемкость экспериментальных и расчетных работ.

Режим сварки был выбран из условия соблюдения переплавления кромок по всей толщине пластины (для АМц: $I = 195 \pm 210$ а; $U = 19 \pm 20$ в; $v = 0,8$ см/сек; соответственно для ВТИ-1 150 ± 160 а, 17 ± 18 в, $0,8$ см/сек; для IX18Н9Т 160 ± 170 а, 16 ± 18 в, $0,8$ см/сек; и для нимоника 80А 180 ± 185 а, 16 ± 17 в, $0,8$ см/сек).

Для проведения экспериментов была создана специальная установка. Температуру сопутствующего подогрева выбирали в долях от температуры плавления сплавов и выдерживали постоянной, с помощью терморегулятора и потенциометра типа ПСГ1-03, до выравнивания температуры после сварки по всему объему образца.

Весь цикл эксперимента протекал следующим образом: отожженная пластина вставлялась в печь, нагревалась до определенной температуры и кромка пластины переплавлялась вольфрамовым электродом без присадки автоматической аргоно-дуговой сваркой. В процессе сварки и охлаждения осуществляли запись термических циклов (ЭПП09-2М) для трех точек на различных расстояниях от переплавляемой кромки пластины.

Одновременно с записью термических циклов в процессе сварки и охлаждения проводили измерение прогиба пластины на базе 28 см через каждые 5 сек.

Остаточные деформации и напряжения в переплавляемых пластинах определяли механическим методом при помощи механического деформометра конструкции ИВТУ им. Баумана.

На основании экспериментальных исследований установлено, что при прочих равных условиях сварки величина временного максимального и остаточного прогиба в пластинах из различных сплавов существенно различна.

С уменьшением ширины пластины величина временного максимального и остаточного прогиба увеличивается. Эта тенденция сохраняется для всех исследуемых сплавов (АМц, ВТИ-1, IX18N9T, нимоник 80A, Ст.3 и 25X1ГСА) за исключением пластины шириной 2,5 см из сплава АМц, что объясняется существенным выравниванием температуры по ширине пластины, ввиду ее высокой теплопроводности.

Влияние $T_{\text{п}}$ на величину временного максимального и остаточного прогиба для всех исследуемых сплавов и жесткостей различно. Увеличение $T_{\text{п}}$ приводит к монотонному уменьшению временного максимального и остаточного прогиба во всех исследуемых ширинах пластин из сплавов ВТИ-1, IX18N9T, нимоника 80A, Ст.3 и 25X1ГСА, что объясняется уменьшением перепада температуры по ширине пластины с увеличением $T_{\text{п}}$ и соответствующим уменьшением пластических деформаций укорочения. Исключением являются случаи переплавления кромки пластины шириной 2,5 и 5,0 см из нимоника 80A и 2,5 см из стали IX18N9T, Ст.3 и 25X1ГСА, в которых с увеличением $T_{\text{п}}$ временный максимальный прогиб уменьшается до некоторого значения, а при дальнейшем росте $T_{\text{п}}$ увеличивается.

Пластины из сплава АМц ведут себя иначе. Величина временно-го максимального прогиба уменьшается с увеличением $T_{\text{п}}$ до определенного значения, а при дальнейшем росте $T_{\text{п}}$ увеличивается. Закономерность изменения остаточного прогиба противоположная. Неоднозначность этой зависимости можно предположительно объяснить следующим образом. По мере повышения $T_{\text{п}}$ расширяется ширина зоны пластических деформаций укорочения, в результате чего увеличивается остаточный прогиб. Начиная с некоторой $T_{\text{п}}$, за счет быстрого выравнивания температуры по ширине пластины уменьшается пластическая деформация удлинения, соответственно остаточная пластическая деформация укорочения, что приводит к уменьшению остаточного прогиба.

Во всех исследованных случаях влияние сопутствующего подогрева резче проявляется при малых ширинах пластин.

Зависимости остаточных прогибов от ширины пластин и $T_{\text{п}}$ аналогичны зависимостям остаточных внешних деформаций от указанных параметров. Полученные данные о влиянии сопутствующего подогрева и ширины свариваемых элементов на величину остаточных внешних деформаций подтверждают гипотезы плоских сечений во всех рассмотренных случаях.

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что увеличение $T_{\text{п}}$ и уменьшение ширины пластин приводит к уменьшению продольных составляющих остаточных напряжений в сварном шве. При этом подогрев снижает напряжения по всему сечению, а уменьшение ширины пластины может повышать напряжения как в центре пластины, так и на ее кромках.

Наибольшее влияние на величину остаточных продольных напряжений оказывает увеличение $T_{\text{п}}$ и ширины пластин в сплавах АМц и ВТІ-І и наименьшее в сплавах ІХІВН9Т и нимоник 80А. Этот факт потребовал дополнительного анализа явлений.

Глава III. РАСЧЕТ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ И УТОЧНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ

С целью изучения влияния сопутствующего подогрева на процесс развития внутренних напряжений и деформаций при сварке использован алгоритм и программа, разработанные Н.Никол.Прохоровым. Однако к ним были добавлены новые блоки учета влияния сопутствующего подогрева, блок расчета внутренних деформаций и прогиба пластины.

Напряженное состояние, возникающее при переплавлении кромок

пластины в расчетах аппроксимировали схемой линейного напряженного состояния, которое развивается при соблюдении плоской формы поперечного сечения. Механические свойства сплавов аппроксимировали упруго-пластической моделью с плавноизменяющимися значениями предела текучести и модуля упругости. Принятые в расчетах температурные зависимости предела текучести σ_T даны на рис. 1.

Последовательность расчета принята следующая:

1. Расчет температурных полей в пластине при переплавлении ее линейным источником тепла, движущимся с ограниченной скоростью, с учетом влияния сопутствующего подогрева и отражения тепловой волны от кромок параллельных направлению движения источника.

2. Нахождение распределения продольных внешних деформаций из уравнения равновесия плоского сечения:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x^o &= (4A - B) \frac{\sigma}{2} \\ \epsilon_x^h &= (2A - \epsilon_x^o) \frac{\sigma}{2} \end{aligned} \right\}$$

$$A = \sum_{i=0}^n \epsilon_n^i - \frac{\epsilon_n^o + \epsilon_n^n}{2}$$

$$B = 2 \sum_{i=1}^n \epsilon_n^i (i - n) \epsilon_n^n + \frac{\epsilon_n^o - \epsilon_n^i}{2}$$

здесь

где n — число ячеек, на которое разбивается поперечное сечение при решении задач численным методом;

i — номер рассматриваемой ячейки;

ϵ_n^i — значение функции ϵ_n в i -той ячейке;

ϵ_x^o и ϵ_x^h — внешние деформации крайних волокон.

3. Расчет внутренних деформаций и напряжений, темпов деформирования, прогиба пластины и т.д.

При расчете полей температур и последующем теоретическом определении напряжений и деформаций их значения определяли методом сеток в 2400 точках (24 поперечных сечения в пластине, по 100 точек в сечении). Расчеты производили на ЭЦВМ "Минск-22М".

Результаты расчетов и вытекающие из них практические рекомендации существенным образом зависят от степени соответствия расчетного температурного поля истинному, имеющему место при сварке. Недостаточная точность расчета температуры вызывает погрешности в вычислении деформаций и напряжений, а это приводит к ошибочным заключениям.

Хорошее совпадение расчетных температур с экспериментальными обеспечивается правильным выбором значений эффективного к.п.д. дуги, коэффициентов теплопроводности и поверхностной теплоотдачи. Непосредственное определение значения этих коэффициентов при сварке затруднительно, вследствие сложной зависимости их от других параметров.

Поэтому эти коэффициенты были выбраны на основе эксперимента.

Правомерность подобного выбора констант объясняется тем, что величины λ и α зависят от температуры и поэтому приняты для расчета некоторые постоянные значения коэффициентов λ и α должны обеспечивать достаточно точное совпадение расчетных и экспериментальных температурных полей. При этом, конечно, установленные (принятые в расчете) значения этих коэффициентов должны находиться в пределах изменения этих величин в диапазоне температур от температуры сопутствующего подогрева до температуры плавления.

Определение эффективного к.п.д. реального процесса сварки путем calorиметрических исследований оказывается весьма трудоемким и практически трудно выполнимым. Поэтому величину η также выбирали на основе сопоставления расчетных и экспериментальных термических циклов.

В целях качественной и количественной оценки степени достоверности выбранной расчетной схемы в последнем параграфе этой главы приводится сопоставление изменения во времени расчетного прогиба и продольной составляющей остаточного напряжения с экспериментально полученными данными. Выбор прогиба в качестве одного из основных параметров для оценки расчетной схемы обусловлен тем, что прогиб является некоторой комплексной характеристикой, значение которой определяется целым рядом областей, находящихся в различных температурных состояниях (чего нельзя, например, сказать о внешних деформациях). В связи с этим факт совпадения расчетного и экспериментального прогиба позволяет сделать вывод о правильности данных расчета деформаций в любом из сечений пластины в различные моменты времени.

В работе установлено, что качественные и количественные временные зависимости прогибов и остаточных напряжений, получаемые расчетным путем, подтверждаются экспериментально. При этом среднее отклонение расчетных данных от эксперимента составляет примерно 10-15%.

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных позволяет использовать выбранную расчетную схему с целью исследования влияния сопутствующего подогрева на процесс развития внутренних напряжений и деформаций и расширить область исследований.

Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПУТСТВУЮЩЕГО ПОДОГРЕВА НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Влиянию подогрева на остаточные напряжения посвящены работы Г.А.Николаева, В.П.Болодина, Н.О.Окерблона, В.Н.Земзина, Г.Б.Талыпова, Кунца, Лотвеллера, Спратена и Кордови и др. авторов. Сведения содержащиеся в литературе об эффективности влияния подогрева на снижение уровня внутренних напряжений весьма противоречивы и не систематизированы.

В связи с этим настоящая глава посвящена исследованию механизма влияния сопутствующего подогрева на процесс развития внутренних напряжений в зависимости от теплофизических и механических свойств сплавов, ширины свариваемых элементов и режима сварки.

На основании проведенных исследований установлено, что изменение теплофизических свойств металлов в широких пределах существенно влияет на процесс перераспределения и формирования остаточных напряжений. Например, в алюминиевом сплаве напряжения в переплавляемом волокне близки к нулю на протяжении всего цикла сварки, в то время как в других сплавах остаточные напряжения приближаются к значению предела текучести, за исключением сплава ВТІ-І, в котором остаточные напряжения также малы.

Общий характер эпюр напряжений при применении сопутствующего подогрева сохраняется. Максимумы растягивающих напряжений, которые имеют место в околошовной зоне, и сжимающих напряжений в середине пластины с увеличением T_{II} удаляются от переплавляемой кромки, а абсолютные значения остаточных напряжений снижаются по всему поперечному сечению пластины. Однако, в жаропрочных сплавах остаточные напряжения при применении подогрева изменяются незначительно, а в сплавах АМц и ВТІ-І существенно.

На основании анализа кинетики развития внутренних напряжений в металле шва (см.рис. І) установлено, что функция напряжений от температуры для всех случаев состоит из двух участков: высокотемпературного, при котором эта функция совпадает с температурной зависимостью предела текучести и низкотемпературного, где указанные функции не совпадают и значения внутренних напряжений в ме-

талле шва изменяются в большинстве случаев относительно мало в процессе охлаждения. Характерной температурой является граница высоко- и низкотемпературных областей, где впервые нарушается равенство между внутренними напряжениями и пределом текучести, другими словами, где происходит переход процесса деформирования от упругопластического к упругому.

С повышением T_p температура перехода от упругопластической стадии процесса к упругой увеличивается и остаточные напряжения в металле шва снижаются.

Ширина свариваемых элементов и тепловой режим сварки различно влияют на температуру (T_p) перехода от упругопластического к упругому процессу и, как следствие, на значения остаточных напряжений. Уменьшение ширины свариваемых элементов приводит к увеличению, а уменьшение погонной энергии сварки (увеличение скорости сварки) наоборот, к снижению этой температуры.

Эффективное влияние сопутствующего подогрева, увеличения погонной энергии и уменьшения ширины свариваемых элементов с точки зрения уменьшения уровня остаточных напряжений, наблюдается в максимальной степени на пластинах из сплава ВТІ-І, наименее эффективно - в сплаве нимоник 80А. Это объясняется температурной зависимостью предела текучести. Чем меньше температура предела текучести в низкотемпературной области, тем меньше влияние указанных выше параметров на изменение величины остаточных напряжений. Другими словами с увеличением жаропрочности сплавов влияние сопутствующего подогрева, изменения режима сварки и ширины свариваемых элементов на относительное изменение остаточных напряжений уменьшается.

Одной из причин, вызывающих наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений в сплаве АИц, является высокая теплопроводность, приводящая к снижению темпов деформирования в низкотемпературной области, вследствие быстрого выравнивания температур по сечению пластин.

Глава V. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПУТСТВУЮЩЕГО ПОДОГРЕВА НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ДЕФОРМАЦИЙ В МЕТАЛЛЕ ШВА

Горячие трещины в металле шва являются одним из наиболее распространенных и опасных дефектов сварных соединений. Этот вид разрушения в различной мере присущ всем металлам и сплавам в процессе сварки.

Вероятность образования горячих трещин, согласно теории технологической прочности Н.Н.Прохорова, зависит от соотношения следующих факторов: 1) темпа деформации металла в температурном интервале хрупкости (ТИХ); 2) пластичности металла в ТИХ; 3) величины ТИХ.

С целью аналитической оценки технологической прочности металла шва в процессе кристаллизации в настоящей главе приводятся данные о влиянии сопутствующего подогрева и ширины свариваемых элементов на процесс развития внутренних деформаций в металле шва при сварке.

Результаты исследований показывают, что увеличение ширины пластины ведет к уменьшению высокотемпературных деформаций удлинения и низкотемпературных деформаций укорочения. Одинаковое изменение ширины пластин из различных сплавов приводит к разному изменению процесса развития деформаций.

Уменьшение ширины оплавленных пластин с 15 см до 5 см приводит к увеличению темпов внешних деформаций в 4-5 раз на сплавах ТХ18Н9Т, никоника 80А и ВТ1-1. Это объясняется тем, что с уменьшением ширины пластины максимум кривой функции внешних деформаций от температуры, перемещаясь в высокотемпературную область, попадает в ТИХ. На сплаве АМц, напротив, с уменьшением ширины свариваемых пластин происходит очень резкое уменьшение темпов внешних деформаций. Это объясняется тем, что благодаря высокой теплопроводности сплава АМц, на пластинах малой ширины происходит быстрое выравнивание температуры в поперечном сечении. При этом максимальное значение функции внешних деформаций от температуры, перемещаясь в высокотемпературную область, попадает выше температуры плавления.

Темпы внутренних деформаций также увеличиваются с уменьшением ширины пластины, кроме случая переплавления кромки пластины из сплава АМц, где эта зависимость носит обратный характер в силу тех же причин, что и уменьшение темпа внешних деформаций при уменьшении ширины пластины.

Во всех рассмотренных случаях сопутствующий подогрев увеличивает внешние высокотемпературные деформации и смещает их максимумы в сторону высоких температур.

Во всех случаях, (кроме АМц в диапазоне $T_{\text{п}}/T_{\text{пл}} > 0,15$) в исследованных диапазонах увеличение температуры сопутствующего подогрева приводит к увеличению темпа внешних деформаций. Это объясняется тем, что увеличение $T_{\text{п}}$ приводит к увеличению относи-

тельной ширины области пластического состояния и уменьшению области упругого состояния металла (рис.2), т.е. уменьшается сопротивление деформированию пластины с одновременным нарастанием усадочных усилий. Это приводит к увеличению интенсивности нарастания внешних деформаций.

С некоторого этапа увеличение T_{Π} может вызвать уменьшением темпов внешних деформаций, как это происходит в сплаве АМц. Это явление объясняется тем, что начиная с некоторых значений температур сопутствующего подогрева наблюдается быстрое выравнивание температуры по поперечному сечению пластины. Естественно, что в пластине из сплава АМц это происходит при наиболее низких значениях относительных температур сопутствующего подогрева. С уменьшением ширины переплавляемых пластин максимум функции темпов внешних деформаций от относительной температуры подогрева ($T_{\Pi}/T_{\text{пл}}$) в силу тех же причин должен смещаться в сторону более низких значений относительных температур подогрева.

Во всех рассмотренных случаях увеличение T_{Π} приводит также к увеличению абсолютных значений внутренних деформаций в высокотемпературной зоне и к их снижению в низкотемпературной области. Это объясняется тем, что в высокотемпературной области внешняя деформация при охлаждении положительна (удлинение волокна), а свободная деформация отрицательна (температурное сокращение). Так как внутренняя деформация равна сумме внешних и свободных деформаций, то увеличение внешней деформации в этой области приводит к увеличению внутренней деформации. В низкотемпературной области происходит сокращение внешних размеров пластин и температурных (свободных) деформаций укорочения. Повышение T_{Π} интенсифицирует внешние деформации укорочения в этой области и тем самым способствует уменьшению внутренних деформаций.

С увеличением T_{Π} темп внутренней деформации в ТИХ монотонно увеличивается для всех сплавов, кроме АМц. Кривая, соответствующая темпу внутренней деформации пластины в ТИХ из сплава АМц проходит через максимум, т.е. выше $T_{\Pi} = 1000^{\circ}\text{C}$, сопутствующий подогрев уменьшает темп внутренних деформаций в металле шва. Остальные кривые, по-видимому, тоже проходят через максимум, но при больших, по сравнению с исследованными, значениях $T_{\Pi}/T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ температура плавления сплава). Причиной этого является меньшая теплопроводность остальных сплавов.

В процессе кристаллизации формируется первичная структура металла шва, т.е. форма и размеры кристаллитов, их взаимное

расположение, форма дендритных образований, а также характер распределения фазовых выделений. Все эти факторы оказывают влияние на деформационную способность и соответственно на прочность металла шва в процессе сварки.

В связи с этим последний параграф этой главы посвящен исследованию влияния сопутствующего подогрева на первичную структуру металла шва и околошовной зоны.

Проведенное металлографическое исследование позволило установить, что с увеличением температуры сопутствующего подогрева происходит огрубление структуры металла шва и околошовной зоны во всех исследуемых сплавах.

Наглядным примером влияния температуры сопутствующего подогрева на технологическую прочность может служить сварка пластин шириной 5 см из никоника 80А. При сварке с сопутствующим подогревом 200°C размеры зерен в околошовной зоне увеличиваются примерно в 1,5 раза по сравнению со сваркой без подогрева, а с подогревом 400°C размеры зерен увеличиваются в 3 + 3,5 раза. При сварке с подогревом 500°C размеры зерен в околошовной зоне увеличиваются в 5 раз.

Обнаружено, что с увеличением размера зерна увеличивается вероятность образования горячих трещин. Это обстоятельство можно объяснить существенным падением пластичности металла в ТИХ, за счет увеличения размера кристаллитов, а также увеличением темпа внутренних деформаций.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В работе проведены экспериментальные и расчетные исследования процессов развития продольных составляющих внутренних и внешних деформаций, продольных составляющих напряжений, прогиба и, соответственно, кривизны при переплавлении кромок пластин в зависимости от температуры сопутствующего подогрева, ширины свариваемых элементов, теплофизических и механических свойств сплавов и режимов сварки.

Исследования в основном проведены на образцах из сплавов АМц, ВТІ-І, ІХІВНІТ и никоник 80А.

2. На основании проведенных исследований установлено, что зависимость прогиба и, следовательно, кривизны пластин от температуры сопутствующего подогрева носит не монотонный характер. Для всех исследованных сплавов и ширин были установлены температуры подогрева, приводящие к экстремальным значениям прогибов.

3. Установлено, что при условии удовлетворительного совпадения расчетной тепловой обстановки с экспериментальной принятый алгоритм решения задачи позволяет получать расчетные сведения о процессах деформирования свариваемых элементов (в условиях сопутствующего подогрева), удовлетворительно согласующиеся с экспериментально наблюдаемыми. Среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет примерно 10 - 15%.

4. Установлено, что при охлаждении процесс развития деформаций делится на два этапа: высокотемпературный - упругопластический и низкотемпературный, когда развиваются чисто упругие деформации. Увеличение температуры T_p перехода от первого этапа ко второму, как правило, приводит к снижению остаточных напряжений.

5. Значение температуры T_p приблизительно соответствует температуре, при которой темп внешних деформаций становится равным коэффициенту линейного расширения, и, таким образом, T_p определяется теплофизическими свойствами сплавов, температурой сопутствующего подогрева, шириной свариваемых элементов и режимом сварки.

Применение сопутствующего подогрева во всех исследованных сплавах ведет к увеличению температуры T_p .

6. Расчетным и экспериментальным путем установлено, что эффективность влияния сопутствующего подогрева, увеличения погонной энергии сварки и уменьшения жесткости свариваемых элементов, с точки зрения уменьшения уровня остаточных напряжений, зависит от температурной зависимости предела текучести сплава. Чем меньше темп нарастания предела текучести в низкотемпературной области, тем меньше влияние указанных параметров на изменение величины остаточных напряжений. Значение $(\sigma/\sigma_0)_{ост}$ возрастает также с увеличением темпа внутренних деформаций в низкотемпературной зоне.

7. Уменьшение жесткости свариваемых пластин приводит к увеличению абсолютной величины временных и остаточных внешних деформаций, темпов деформирования в высокотемпературной области и, следовательно, к увеличению вероятности возникновения горячих трещин во всех исследуемых сплавах. Исключение представляют узкие пластины, в которых наблюдаются относительно малые градиенты температур в поперечных сечениях свариваемых образцов.

Увеличение темпов внутренних деформаций с уменьшением жесткости пластин не является следствием специфических свойств сплавов, а определяется физической сущностью процессов термомеханического возмущения при сварке.

8. Сопутствующий подогрев до температур $0,4 T_{пл}$ во всех рассмотренных сплавах ведет к увеличению абсолютных значений внешней

деформации, темпа внешней деформации металла шва в высокотемпературной области, температуры, при которой темп внутренних деформаций равняется нулю и к уменьшению остаточных значений растягивающих внутренних деформаций.

9. Впервые было установлено, что во всех исследованных сплавах с увеличением температуры сопутствующего подогрева увеличивается темп внутренних деформаций в металле шва в ТИХе. Таким образом с точки зрения влияния на темп деформирования в ТИХе можно утверждать, что в рассматриваемых случаях применение сопутствующего подогрева может увеличивать вероятность возникновения горячих трещин.

На сплаве АМц зависимость темпа внутренних деформаций от температуры сопутствующего подогрева проходит через максимум. Аналогичный максимум функции темпов внутренних деформаций от температуры сопутствующего подогрева для остальных сплавов очевидно имеет место при высоких значениях $T_{\text{п}}/T_{\text{пл}}$, вследствие их относительно малой теплопроводности. С увеличением ширины переплавляемых пластин и уменьшением погонной энергии сварки максимум функции темпов внутренних деформаций от относительной температуры подогрева ($T_{\text{п}}/T_{\text{пл}}$) должен смещаться в сторону больших значений $T_{\text{п}}/T_{\text{пл}}$.

10. В работе было установлено влияние температуры сопутствующего подогрева, режима сварки и ширины свариваемых полос на процесс развития продольных составляющих внутренних напряжений, внешних и внутренних деформаций в металле шва, кривизны пластин из сплавов АМц, ВТИ-1, IX18N9T и нимоник 80А.

Полученные данные позволят инженерам и технологам сварщикам правильно ориентироваться при выборе температуры сопутствующего подогрева, режима сварки и т.д. с целью регулирования внутренних напряжений и деформаций, кривизны пластин и вероятности образования горячих трещин при применении подогрева во время сварки металлов.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Прохоров Н.Никол., Магеррамов А.Г., Филимонова Н.М. Влияние теплофизических свойств металлов на развитие напряжений и деформаций при сварке. "Сварочное производство", № 1, 1972.
2. Прохоров Н.Н., Магеррамов А.Г. Влияние температуры подогрева на развитие внутренних напряжений и деформаций при сварке. Тезисы докладов XXII научной конференции АзНИ им. Ч.Ильдырма, г. Баку, 1971.

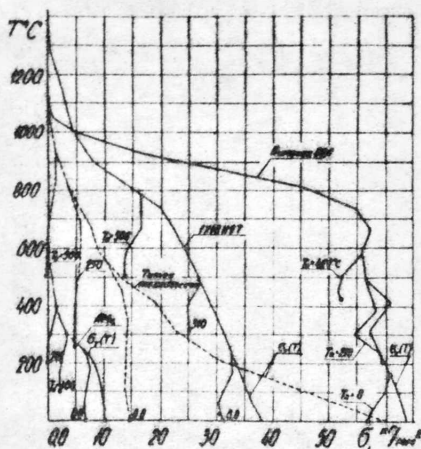


Рис. 1. Температурная зависимость напряжений в металле шва для различных температур сопутствующего подогрева

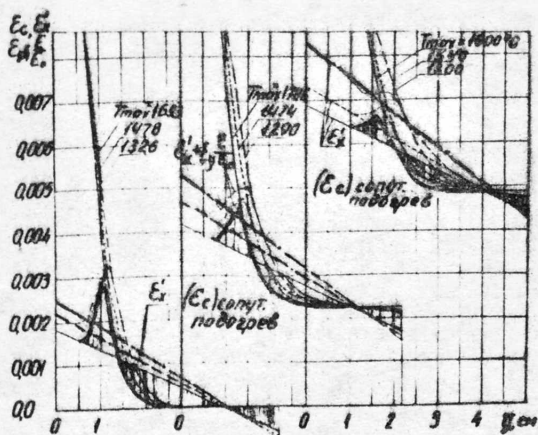


Рис. 2. Перераспределение свободных деформаций, внешних деформаций и упругих составляющих внутренней деформации во времени при сварке BTI-1 с различным сопутствующим подогревом.