

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ НАУКИ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ  
САМАРСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. БОРОЛЕВА

Л. А. ДУДАРЬ

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ,  
ВОЗНИКАЮЩИЕ  
ПРИ СВАРКЕ УЗЛОВ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Учебное пособие*

УДК 621.791.011(075)

*Деформации и напряжения, возникающие при сварке узлов летательных аппаратов: Учеб. пособие / Л. А. Дударь; Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992. 87 с.  
ISBN 5-230-16910-9*

Изложены основы теории сварочных деформаций и напряжений. Рассмотрены методы уменьшения и устранения сварочных деформаций и напряжений, нашедшие применение в производстве летательных аппаратов.

Подготовлено на кафедре «Производство летательных аппаратов» и предназначено для слушателей факультетов повышения ПТР и студентов авиационных вузов, обучающихся по специальностям 1301, 1306, 1307, 1302, 1304.

Может быть полезно также инженерам и техникам, работающим в области проектирования и производства летательных аппаратов и двигателей.

Табл. 1. Ил. 63. Библиогр.: 63 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева

Рецензенты: А. Е. Эндельштейн, В. Б. Матвеев

ISBN 5-230-16910-9

С. Издается по лицензии Самарского авиационного института  
ДР № 020301

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе изготовления сварных конструкций часто возникают деформации, нарушающие проектные размеры и форму. Деформации конструкций в процессе сварки сопровождаются возникновением напряжений. Как деформации сварных конструкций, так и напряжения в них меняются в процессе сварки по величине и по знаку, достигая к моменту полного остывания конструкций некоторой величины, которая сохраняется неизменной, если конструкция не подвергается последующему нагреву или действию внешних сил. Деформации и напряжения, существующие в те или иные моменты сварки, называют временными.

Деформации и напряжения конечной величины, устанавливающиеся после полного окончания сварки и остывания конструкций, носят название остаточных. Остаточные деформации изделий, вызванные сваркой, создают затруднения на производстве, например в тех случаях, когда крупная конструкция изготавливается из отдельных заранее сваренных секций, элементов или узлов.

Остаточные деформации отдельных сваренных узлов или монтажных единиц затрудняют общую сварку конструкции, так как в результате сварки элементы могут получить такие деформации, что их сборка без пригонки окажется невозможной и потребуются доработка сопрягаемых кромок: правка, натяг и тому подобные операции, усложняющие технологию, увеличивающие трудоемкость изготовления сварных конструкций и снижающие в ряде случаев их работоспособность. Поэтому при разработке проекта технологического процесса изготовления сварных конструкций выбирают такую последовательность сборочно-сварочных операций и такие специальные меры, которые обеспечили бы получение элементов сварной конструкции и всей конструкции в целом без значительных деформаций, с минимальными

отклонениями от проектных размеров и формы, допускаемых соответствующими техническими условиями и нормами.

Остаточные напряжения, возникающие в результате сварки, также могут отражаться как на ходе изготовления сварных конструкций, затрудняя отдельные операции (например, механическую обработку), так и на работе конструкций при эксплуатации, снижая в отдельных случаях работоспособность.

Создание сварных конструкций летательных аппаратов, отвечающих высоким требованиям надежности, долговечности, экономичности при изготовлении и эксплуатации — это результат комплексного решения задачи путем рациональных конструктивных решений и совершенствования технологического процесса сварки.

Чтобы иметь возможность регулировать деформации и напряжения при сварке, а следовательно, влиять на их величину и характер, необходимо знать механизм их возникновения и развития. Такие знания нужны студентам авиационных вузов всех специальностей, изучающих сварку.

В данном учебном пособии кратко освещаются вопросы возникновения и определения собственных напряжений, деформаций и перемещений при сварке, а также рассматриваются методы их снижения.

# 1. ДЕФОРМАЦИИ, НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИЙ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В деталях и узлах конструкций ЛА помимо напряжений, возникающих от рабочих нагрузок, могут быть так называемые собственные напряжения, которые существуют в телах при отсутствии каких-либо нагрузок.

В теории сварочных деформаций и напряжений принято использовать следующие расположения осей координат: ось  $O_x$  направлена вдоль шва,  $O_y$  — поперек шва, в плоскости пластины,  $O_z$  — поперек шва в направлении толщины. Собственно различают напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ , деформации  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$ , и перемещения точки тела  $u$  — по оси  $O_x$ ,  $v$  — по оси  $O_y$ ,  $w$  — по оси  $O_z$ .

Для более четкого понимания причин образования собственных напряжений при сварке рассмотрим основные виды деформаций металла.

1. Температурные деформации  $\epsilon_x$  вызваны изменением размера тела при изменении температуры. К температурным деформациям условно относят также деформации, возникающие в процессе структурных превращений:

$$\epsilon_x = \alpha T, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  — средний коэффициент линейного расширения в интервале температур от 0 до  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $T$  — изменение температуры в какой-либо точке тела,  $^{\circ}\text{C}$ .

2. Наблюдаемые деформации  $\epsilon_n$  и  $\nu_n$  характеризуют изменения размеров тела — линейных и угловых, которые можно зарегистрировать измерительными приборами.

3. Собственные (внутренние) деформации состоят из упругих  $\epsilon_{упр}, \nu_{упр}$  и пластических  $\epsilon_{пл}, \nu_{пл}$ .

Указанные виды деформаций связаны между собой соотношениями

$$\epsilon_n = \epsilon_{упр} + \epsilon_{пл} + \epsilon_x \quad (1.2)$$

$$\nu_n = \nu_{упр} + \nu_{пл}, \quad (1.3)$$

Если до процесса нагрева или охлаждения в точке тела возникли начальные пластические деформации  $\epsilon_{0пл}$  и  $\nu_{0пл}$ , вызванные предшествующими деформациями, то формулы (1.2) и (1.3) принимают следующий вид:

$$\epsilon_{пл} = \epsilon_{упр} + \Delta\epsilon_{пл} + \epsilon_{\epsilon} + \epsilon_{0пл}, \quad (1.4)$$

$$\nu_{пл} = \nu_{упр} + \Delta\nu_{пл} + \nu_{0пл}, \quad (1.5)$$

где  $\Delta\epsilon_{пл}$  и  $\Delta\nu_{пл}$  — приращения пластических деформаций на стадии рассматриваемого процесса.

Собственные напряжения классифицируются по различным признакам:

по причине, их вызвавшей, они делятся на напряжения от упругого или пластического механического деформирования при сборке, монтаже и правке; от упругих и пластических деформаций из-за неравномерного нагрева деталей; от неравномерного изменения объема тела при фазовых превращениях;

по времени существования — могут быть временными, существующими в период выполнения технологической операции или протекания физического процесса, и остаточными, устойчиво сохраняющимися в течение длительного периода;

по характеру направленного состояния — одноосные (линейные), двухосные (плоскостные) и трехосные (объемные);

по объемам, в которых они уравновешены — напряжения первого рода (макрообъем) всегда уравновешены в пределах сечения, полностью пересекающего тело; второго рода (зерно) и третьего рода (кристаллическая решетка).

Наблюдаемые деформации вызывают перемещения отдельных точек сварной конструкции. Перемещения элементов сварных конструкций обычно характеризуют прогибами  $f$ , углами поворота  $\beta$ , укорочениями  $\Delta$ , величинами  $\omega$  выхода точек из плоскости и др.

## 1.2. ОБРАЗОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ НАГРЕВЕ И ОСТЫВАНИИ

Рассмотрим образование собственных напряжений на простейшем примере прохождения полного термического цикла закрепленного по концам стержня из малоуглеродистой стали в жестком приспособлении (рис. 1.1, а) [1]. Напряжения сжатия на рис. 1.1, б будем откладывать вниз, а напряжения растяжения — вверх; полные деформации удлинения, равные сумме упругих и пластических, — вправо, а деформации укорочения —

влево. Для определения деформаций будем использовать формулу (1.2), а для определения напряжений формулу

$$\sigma = E \varepsilon_{упр}. \quad (1.6)$$

В закрепленном по концам стержне наблюдаемая деформация  $\varepsilon_n = 0$ . Поэтому из формулы (1.2) для полной собственной деформации следует

$$\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} = \varepsilon_n. \quad (1.7)$$

Так как при нагреве  $\varepsilon_n > 0$ , то согласно (1.7)  $\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} < 0$ , поэтому кривая из точки 0 идет вниз вправо. Пока напряжение  $\sigma$  не достигнет предела текучести в некоторой точке А, соответствующей температуре примерно 100°C, пластических деформаций нет. Участок ОА не является прямой линией, потому что по мере повышения температуры модуль упругости  $E$  несколько уменьшается, и согласно формуле (1.6) напряжения не зависят линейно от  $\varepsilon_{упр}$ . В точке А напряжения достигают предела текучести. При дальнейшем повышении температуры напряжение равно  $\sigma_T$ , хотя полная деформация  $\varepsilon = -\varepsilon_n$  возрастает. На участке АВ вследствие падения  $\sigma_T$  напряжение  $\sigma$  снижается.

В точке В нагрев стержня прекращается. В стержне имеются пластические деформации  $\varepsilon_{п.в}$ , равные согласно (1.7)

$$\varepsilon_{п.в} = -\varepsilon_n \text{ в} - \varepsilon_{упр.в}, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon_{упр.в} = -\sigma_{ТВ}/E_B$ ;  $\sigma_{ТВ}$  и  $E_B$  — предел текучести и модуль упругости металла при температуре  $T_B$ .

При охлаждении отчет пластических деформаций  $\varepsilon_{п.л}$  на стадии остывания стержня следует начать заливо. Пластические деформации  $\varepsilon_{п.л}$  в формуле (1.4) будут играть роль начальных деформаций  $\varepsilon_{оп.л}$ . Так как наблюдаемая деформация равна нулю, имеем

$$\varepsilon_{упр} + \Delta \varepsilon_{п.л} = \varepsilon_n - \varepsilon_{оп.л} = \varepsilon_n. \quad (1.9)$$

На участке ВС напряжения изменяют знак, и пока полная деформация  $\varepsilon < \sigma_T/E$ , пластические деформации отсутствуют —

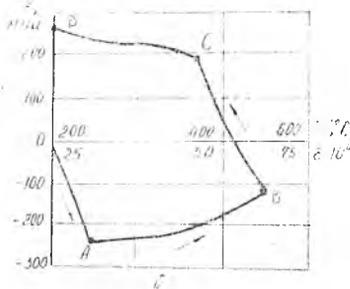


Рис. 1.1. Образование напряжений в стержне с жестко закрепленными концами: а — схема испытания; б — изменение напряжений и деформации в стержне из низкоуглеродистой стали

$\Delta \varepsilon_{пл} = 0$ . В точке С появляются пластические деформации и далее вплоть до полного охлаждения (точка Д) напряжения остаются равными пределу текучести металла при соответствующей температуре согласно кривой  $\sigma_T$ . После полного остывания  $\varepsilon_{\nu} = 0$ . Остаточная пластическая деформация равна алгебраической сумме пластической деформации, возникающей при нагреве, и приращению пластической деформации, возникающей при остывании. Согласно формуле (1.9), с учетом  $\varepsilon_{\nu} = 0$  получим

$$\varepsilon_{опл} + \Delta \varepsilon_{плд} = -\varepsilon_{упр д} = -\sigma_{т д} / E_{д}. \quad (1.10)$$

Остаточная пластическая деформация отрицательна (деформация укорочения). Действительно, если конец растянутого стержня освободить от закрепления, то стержень сократится по длине на размер  $\sigma_{т д} / E_{д}$ . Следует обратить внимание на то, что в случае жестко закрепленного по концам стержня, согласно формуле (1.7), по горизонтальной оси на рис.1,б [1] откладывается температурная деформация  $\varepsilon_{\nu} = \alpha T$ . Если считать значение  $\alpha$  в некотором интервале температур постоянным, то горизонтальную ось можно рассматривать в некотором масштабе и как ось температур.

### 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ [2]

Процесс изготовления сварных конструкций сопровождается искажением их проектных размеров и форм, которое называется сварочными деформациями. Количественная оценка ожидаемых сварочных деформаций—важный этап производства сварных конструкций. Знание величины и характера ожидаемых сварочных деформаций позволяет еще на стадии проектирования сварных конструкций вносить соответствующие изменения, направленные на обеспечение требуемой точности. Не менее важно оценить степень сварочных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления сварной конструкции, так как на основе такой оценки проводится выбор метода снижения сварочных деформаций и назначаются соответствующая технологическая оснастка, а также обоснованные технологические припуски заготовок.

Процесс формирования сварного соединения происходит в условиях неравномерного нагрева, приводящего к развитию деформаций, которые называются временными, изменяющими форму и размеры сварного соединения в процессе сварки. Временные деформации определяют характер и величину остаточных деформаций, выражающихся в послесварочных изменениях геометрии сварной конструкции. В зависимости от типа сварного соединения, его геометрических размеров и сочетания свариваемых элементов все многообразие из-

менения геометрии сварной конструкции можно разделить на несколько видов.

**Деформации продольного укорочения.** Они проявляются в изменении первоначальных размеров свариваемых элементов в направлении, параллельном продольной оси сварного шва. Продольное укорочение вызывается остаточными продольными пластическими деформациями укорочения (только при продольных швах), а также остаточными поперечными пластическими деформациями укорочения (при продольных и поперечных швах).

**Деформации поперечного укорочения.** В этом случае происходит изменение первоначальных размеров свариваемых элементов в направлении, перпендикулярном к продольной оси сварного шва. Поперечное укорочение вызывается остаточными поперечными пластическими деформациями укорочения и линейной усадкой в поперечном направлении расплавленного металла, начиная с температуры восстановления его упрочняющих свойств.

**Угловые деформации.** Эти деформации проявляются при повороте свариваемых листов на некоторый угол относительно исходного положения. Угловые деформации, например, возникают: при однопроходной или многопроходной сварке веток вследствие неравномерной по толщине поперечной пластической деформации укорочения; при сварке тавровых соединений в результате неравномерной пластической деформации по толщине поясного листа или в результате неравномерного поперечного сокращения металла углового шва.

**Деформации потери устойчивости листовых элементов конструкций.** Наиболее часто они встречаются при сварке тонкостенных элементов (до 3...4 мм) и проявляются в виде значительных перемещений из исходной плоскости листовых (оболочковых) элементов. Эти деформации вызываются напряжениями сжатия, возникающими в конструкции преимущественно из-за остаточных пластических продольных деформаций укорочения.

**Деформации изгиба свариваемых элементов,** например, продольный изгиб сварных тавровых или двутавровых балок. Эти деформации обуславливаются несовпадением центра тяжести поперечного сечения зоны остаточных продольных и поперечных пластических деформаций укорочения с центром тяжести поперечного сечения свариваемых элементов.

**Деформации скручивания** относительно продольной оси конструкции. Деформации скручивания вызываются взаимным смещением свариваемых кромок, например, при сварке стенок балок к полкам,

В случае изготовления конструкций сложной геометрической формы, насыщенной сварными швами, изменения проектных размеров и форм конструкции вызываются не одним из перечисленных видов деформаций, а их совокупностью, однако они могут быть дифференцированы на отдельные виды.

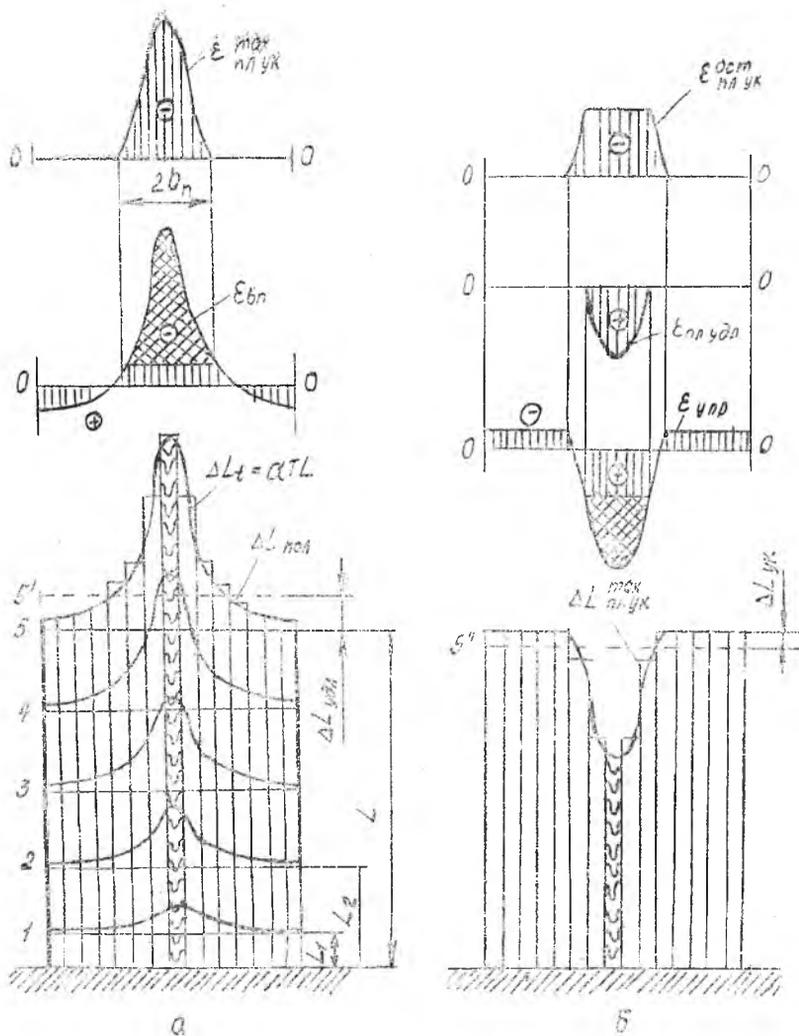


Рис. 1.2. Механизм образования деформаций (а) и напряжений (б) при сварке

#### 1.4. ОБРАЗОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ [2]

Процесс образования напряжений и деформаций рассмотрим в условиях соблюдения гипотезы плоских сечений для полных продольных деформаций и допущений об одновременности сварки шва по всей длине и линейности возникающего напряженного состояния, ориентированного вдоль соединения. На стадии нагрева в средней высоконагретой области соединения в продольном направлении протекают пластические деформации сжатия (укорочения) и формируется так называемая зона пластических деформаций, ширина которой для такого симметричного соединения обычно обозначается  $2b_n$  (рис. 1.2,а) [2].

В относительных деформациях разница между поперечной и температурной деформациями показана на рис. 1.2,а линией  $\epsilon_{вн}$  (внутренняя деформация), прямой штриховкой отмечены уравновешенные по сечению упругие деформации  $\epsilon_{упр}$  и косой — пластические деформации сжатия (укорочения). Таким образом, можно говорить об эпюре максимальных пластических деформаций укорочения  $\epsilon_{вн}^{max}$ , которая на рисунке показана отдельно. На этом рассмотрение стадии нагрева заканчивается.

На стадии же охлаждения в средней части соединения протекают продольные пластические деформации удлинения, которые в значительной мере компенсируют пластическое сжатие, возникшее из стадии нагрева. Тем не менее, компенсации происходит лишь частично. В конечном итоге в средней части соединения (пластической зоне) остаются пластические деформации укорочения определенной величины. Деформации пластического удлинения при охлаждении показаны на рис. 1.2,б косой штриховкой. Упругие остаточные деформации уравновешены по поперечному сечению и отмечены прямой штриховкой. Эпюры пластических деформаций удлинения  $\epsilon_{пл.удл}$  и остаточных пластических деформаций укорочения показаны на том же рисунке отдельно. Именно остаточные пластические деформации укорочения в поперечном сечении и неравномерный характер их распределения по сечению являются причиной образования в сварном соединении остаточных напряжений.

#### 1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСАДОЧНОЙ СИЛЫ

Образование в сварном соединении остаточных продольных и поперечных деформаций укорочения, имеющих местный характер, вызывает в сварном соединении уравновешенную систему внутренних напряжений. Действие распределенных внутренних напряжений при решении деформационных задач заменяют ста-

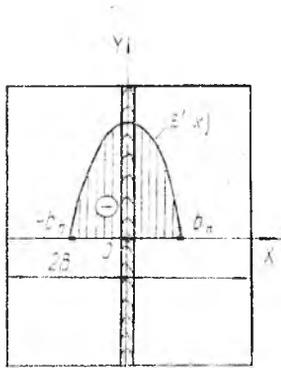


Рис. 1.3. Распределение продольных остаточных пластических деформаций укорочения

тически эквивалентными сосредоточенными силами, называемыми усадочными.

Различают усадочную силу  $P_{yc}^{up}$  от продольных остаточных пластических деформаций укорочения и  $P_{yc}^{поп}$  от остаточной поперечной пластической деформации укорочения, когда она распределена равномерно в сечении, перпендикулярном к направлению ее действия.

Усадочная сила  $P_{yc}^{up}$  пропорциональна площади эпюры остаточных продольных пластических деформаций укорочения  $\epsilon'(x)$  (рис. 1.3) и определяется зависимостью

$$P_{ya}^{up} = SE \int_{-b_n}^{b_n} \epsilon'(x) dx. \quad (1.11)$$

Докажем зависимость (1.11). Полная продольная деформация после сварки в точках произвольного поперечного сечения

$$\epsilon_{пол}(x) = \epsilon_{упр}(x) + \epsilon'(x). \quad (1.12)$$

Пронтегрируем выражение (1.12) по ширине сварного сечения:

$$\int_{-B}^B \epsilon_{пол}(x) dx = \int_{-B}^B \epsilon_{упр}(x) dx + \int_{-B}^B \epsilon'(x) dx. \quad (1.13)$$

Первое слагаемое в правой части (1.13) равно нулю вследствие уравновешенности по сечению упругих деформаций. Тогда

$$\int_{-B}^B \epsilon_{пол}(x) dx = \int_{-B}^B \epsilon'(x) dx. \quad (1.14)$$

Умножим правую и левую части (1.14) на  $SL$ :

$$SL \int_{-B}^B \epsilon_{пол}(x) dx = SL \int_{-B}^B \epsilon'(x) dx.$$

С учетом того, что  $\epsilon'(x)$  распределена только в пределах зоны  $2b_n$ , данное выражение можно переписать в виде

$$SL \int_{-B}^B \varepsilon_{\text{пол}}(x) dx = SL \int_{-bn}^{bn} \varepsilon'(x) dx. \quad (1.15)$$

В левой части (1.15) имеем объем продольного укорочения  $V_{\text{ук}}^{\text{пр}}$  сварного соединения, обусловленного действием сварочных напряжений. Формально объем продольного укорочения можно получить при действии на пластину, размеры которой равны сварному соединению, внешней сосредоточенной усадочной силы. Эту силу при известном объеме продольного укорочения  $V_{\text{ук}}^{\text{пр}}$  определяем по закону Гука

$$P_{\text{ус}}^{\text{пр}} = \frac{\Delta L_{\text{ук}}^{\text{пр}} FE}{L} = \frac{V_{\text{ук}}^{\text{пр}} E}{L}. \quad (1.16)$$

Подставляя в формулу (1.16) вместо  $V_{\text{ук}}^{\text{пр}}$  правую часть (1.15), получаем

$$P_{\text{ус}}^{\text{пр}} = SE \int_{-bn}^{bn} \varepsilon'(x) dx, \quad (1.17)$$

что и требовалось доказать.

Известны и другие зависимости для  $P_{\text{ус}}^{\text{пр}}$ . Например, по данным В. А. Винокурова [3], значение  $P_{\text{ус}}^{\text{пр}}$  при стыковой сварке весьма жестких элементов, выраженное в Ньютонах, может быть определено по формуле

$$P_{\text{ус}}^{\text{пр}} = -[230000/(q_0 + 12600) + 3,58]q/v, \quad (1.18)$$

где  $q$  — эффективная мощность, Дж/с;  $v$  — скорость сварки, см/с;  $q_0 = q/S_{\text{расч}}$  — удельная погонная энергия сварки, Дж/см<sup>2</sup>;  $S$  — расчетная толщина свариваемых элементов, см;  $S_{\text{расч}} = 0,5(S_1 + S_2)$  в стыковых или угловых соединениях или  $S_{\text{расч}} = 0,5(S_n + S_c)$  в тавровом или пахлесточном соединении.

Для прерывистых швов величину  $P_{\text{ус}}^{\text{пр}}$  определяем по формуле

$$P_{\text{ус}}^{\text{пр}} = P_{\text{ус}}^{\text{пр}} (l_{\text{ш}}/l), \quad (1.19)$$

где  $l_{\text{ш}}$  — длина провариваемого участка;  $l$  — шаг прерывистого шва.

Связь между остаточными пластическими поперечными деформациями укорочения и усадочной силой  $p_{\text{yo}}^{\text{нос}}$  установим, рассмотрев процесс поперечного укорочения сварного соединения. При сварке встык свободных (незакрепленных) пластин (рис. 1.4.а) в результате свободной поперечной усадки пластины укоротятся в поперечном направлении на величину  $\Delta_{\text{поп}}^{\text{св}}$ . При этом в поперечном направлении никакие силы не возникают. Если же свариваются пластины, закрепленные по про-

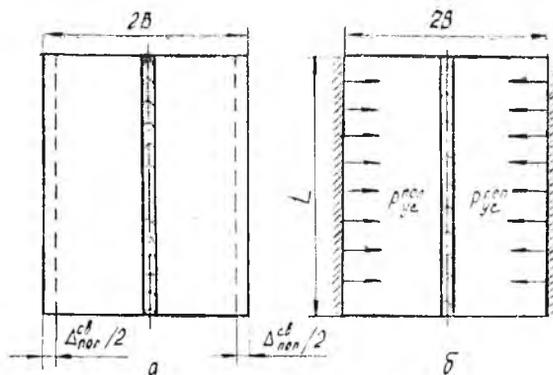


Рис. 1.А. Поперечные деформации при сварке свободных пластин (а) и образование поперечной усадочной силы при сварке закрепленных пластин (б)

дольным кромкам (рис. 1.4,б), то в процессе охлаждения свободное поперечное укорочение  $\Delta_{\text{пер}}^{\text{св}}$  не может реализоваться, и в результате реакции заделки в поперечном направлении возникнут растягивающие силы. Эти силы приведут к развитию поперечных пластических деформаций удлинения  $\Delta_{\text{пер}}^{\text{пл. укл}}$  в зоне сварного соединения, где металл еще не восстановил упругих свойств. Значение  $\Delta_{\text{пер}}^{\text{пл. укл}}$  зависит от жесткости заделки, и в каждом конкретном случае для его определения требуется постановка соответствующего эксперимента.

Таким образом, после освобождения свариваемых пластин от закреплений наблюдается поперечное укорочение

$$\Delta_{\text{пер}}^{\text{пл. укл}} = \Delta_{\text{пер}}^{\text{св}} - \Delta_{\text{пер}}^{\text{пл. укл}} \quad (1.20)$$

Поперечное укорочение  $\Delta_{\text{пер}}^{\text{закр}}$  в условиях закрепления не может реализоваться, что приведет к возникновению в заделке реактивной силы

$$P_{\text{ус}}^{\text{пол}} = \Delta_{\text{пер}}^{\text{закр}} ELS/2B \quad (1.21)$$

Определение усадочной силы представляет собой решение термомеханической задачи и является первым этапом расчета сварочных деформаций. На втором теоретическом этапе методами сопротивления материалов или теории упругости определяют деформации конструкции, используя данные, полученные на первом этапе.

## 1.6. ДЕФОРМАЦИИ ПРОДОЛЬНОГО УКОРОЧЕНИЯ ОТ ПРОДОЛЬНЫХ ШВОВ

Деформации продольного укорочения (рис. 1.5) [2] определяются действием  $\varepsilon'$  в пластической зоне с поперечным сечением  $F_{\text{пл}}$ . Как было уже показано, действие  $\varepsilon'$  можно представить в виде продольной усадочной силы  $P_{\text{ус}}^{\text{пр}}$ , приложенной в центре тяжести зоны  $F_{\text{пл}}$ . Продольное укорочение будет определяться как результат решения задачи

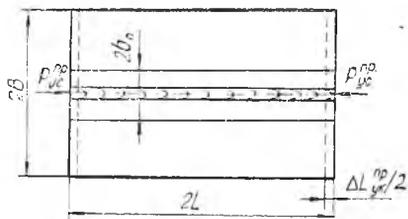


Рис. 1.5. Расчетная схема для определения продольного укорочения при сварке встык

нагружения свободного от внутренних сил тела сосредоточенной внешней сжимающей силой  $P_{\text{ус}}^{\text{пр}}$ . Тогда по закону Гуна продольное укорочение можно найти по формуле

$$\Delta L_{\text{ук}}^{\text{пр}} = (P_{\text{ус}}^{\text{пр}} L) / EF, \quad (1.22)$$

где  $L$  — длина соединения;  $E$  — модуль упругости;  $F$  — площадь поперечного сечения соединения.

## 1.7. ДЕФОРМАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО УКОРОЧЕНИЯ

Рассмотрим свободное поперечное укорочение  $\Delta_{\text{поп}}^{\text{св}}$  для двух случаев сварки: с зазором и без зазора.

При сварке с зазором в результате нагрева дугой свариваемые кромки будут перемещаться в зазор, так как отсутствуют какие-либо препятствия для их перемещения. Перемещение кромок в свободном стыковом соединении с зазором показано на рис. 1.6 [2]. Максимально возможное перемещение одной кромки

$$\Delta_{\text{поп кр}}^{\text{св max}} = \int_0^{\infty} \varepsilon_t dy = \int_0^{\infty} \alpha T(y) dy. \quad (1.23)$$

При отсутствии теплопередачи в воздухе

$$\Delta_{\text{поп кр}}^{\text{св max}} = \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{vS}, \quad (1.24)$$

где  $\varepsilon_t$  — температурная деформация;  $T(y)$  — температура точек рассматриваемого поперечного сечения;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $c\gamma$  — удельная теплоемкость;  $q$  — эффек-

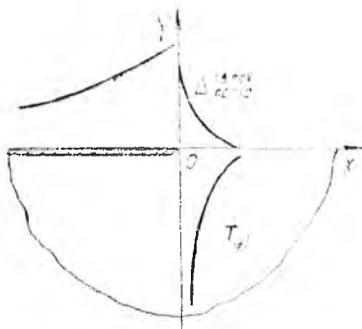


Рис. 16. Свободное перемещение кромок

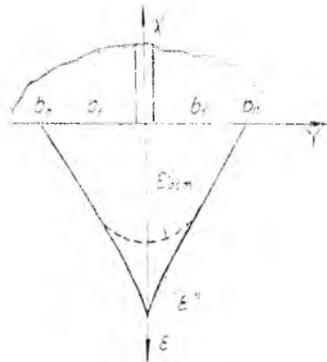


Рис. 17. Распределение продольной пластической деформации укорочения

тивная мощность источника нагрева;  $v$  — скорость сварки;  $S$  — толщина свариваемого металла.

На стадии охлаждения, начиная с момента кристаллизации металла ванны, т. е. температуры  $T_{пл}$ , вследствие температурного укорочения начнут развиваться поперечные по отношению к шву пластические деформации удлинения, так как свободному температурному укорочению будут препятствовать менее нагретые поперечные волокна металла впереди и сзади ванны. Такая пластическая деформация будет на участке, где металл находится в температурном интервале от температуры плавления  $T_{пл}$  до температуры восстановления упругих свойств металла  $T^*$ , т. е. на ширине зоны  $b_1$ . Следовательно, поперечное пластическое удлинение

$$\Delta_{\text{поп}}^{\text{удл}} = \int_0^{b_1} \alpha (T_{\text{пл}} - T^*) dy \approx \alpha b_1 (T_{\text{пл}} - T^*), \quad (1.25)$$

Дальнейшее понижение температуры от  $T^*$  будет вызывать в поперечном направлении упругие деформации растяжения. Как показывают исследования временных и остаточных поперечных напряжений при сварке встык, величина этих напряжений не достигает значений предела текучести, что говорит об отсутствии на этой стадии охлаждения пластических деформаций удлинения. Значит, остаточное поперечное перемещение одной кромки

$$\Delta_{\text{поп кр}}^{\text{ост}} = \Delta_{\text{поп}}^{\text{упр макс}} = \alpha \left[ \frac{q}{c \gamma v S} - b_1 (T_{\text{пл}} - T^*) \right], \quad (1.26)$$

Если величина зазора превышает  $2\Delta_{\text{доп кр}}^{\text{max}}$ , то это означает, что такое перемещение каждой кромки возможно и, следовательно, остаточное поперечное укорочение будет равно остаточному перемещению двух кромок:  $\Delta_{\text{поп}}^{\text{н}} = 2\Delta_{\text{доп кр}}^{\text{ост}}$ .

В случае сварки без зазора свободное перемещение кромок не реализуется, оно все трансформируется в пластическое укорочение  $\epsilon''$ , неравномерно распределенное по ширине зоны  $2bn$ , изменяясь от нуля на границе  $bn$  до максимума на оси шва (рис. 1.7) [2].

С учетом пластического поперечного удлинения на ширине  $2bn$  при охлаждении в этой зоне величина остаточного пластического укорочения меньше.

Для случая сварки без зазора

$$\Delta_{\text{доп}}^{\text{св}} = 2 \int_0^{bn} \epsilon''_{\text{ост}}(y) dy. \quad (1.27)$$

Закон распределения  $\epsilon''_{\text{ост}}$  по ширине пластической зоны в настоящее время мало изучен. По экспериментальным данным

$$\epsilon''_{\text{ост}} = (\alpha T^*) \sqrt{bn^2 - y^2} / bn. \quad (1.28)$$

Подставляя формулу (1.28) в (1.27), получим

$$\Delta_{\text{поп}}^{\text{св}} = \pi \alpha T^* bn / 2. \quad (1.29)$$

Поперечное укорочение  $\Delta_{\text{поп}}$  при сварке наблюдается либо когда отсутствуют препятствия (закрепления) для свободного перемещения точек свариваемых элементов в направлении поперек шва, либо когда имеется закрепление, частично ограничивающее это перемещение.

### 1.8. УГЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Угловая деформация заключается в повороте свариваемых листов на некоторый угол относительно исходного положения. Угловая деформация возникает при сварке однопроводных и многопроводных сварных соединений со стыковыми и угловыми швами. На рис. 1.8 показана угловая деформация в стыковом и тавровом соединениях. Величина угловой деформации равна углу  $\beta$ .

При сварке стыковых соединений основной причиной образования угловой деформации является неравномерность поперечной усадки различных слоев металла по толщине вследствие неравномерного разогрева. В наибольшей степени угловая де-

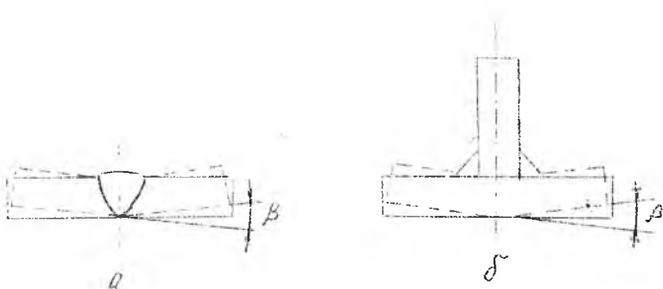


Рис. 1.8. Угловая деформация в стыковом (а) и тавровом (б) соединениях

формация проявляется при односторонней стыковой сварке свободных пластин с V-образной разделкой кромок.

Величина угловой деформации  $\beta$  зависит от многих факторов: относительной глубины провара  $H/S$ , относительной ширины провара  $e/S$ , формы провара, механических и теплофизических свойств материала и др. На рис. 1.9 показано изменение угловой деформации от относительной глубины провара.

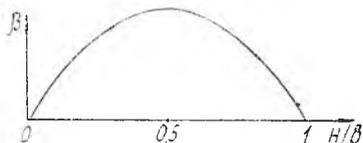


Рис. 1.9. Зависимость угловой деформации от относительной глубины провара

средоточенностью, мощностью и скоростью движения источника нагрева, а также свойствами материала.

При сварке в свободном состоянии тавровых соединений угловыми швами суммарная угловая деформация  $\beta$  (рис. 1.10,а) будет определяться не только неравномерностью разогрева плоского листа по толщине  $\beta_1$  (рис. 1.10,б), но и поворотом этого листа как жесткого целого относительно стенки на некоторый

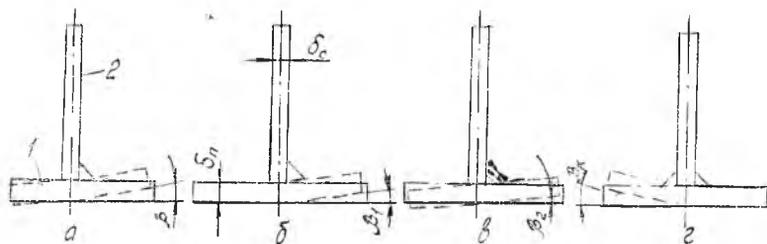


Рис. 1.10. Угловая деформация при сварке тавровых соединений

угол  $\beta_2$  (рис. 1.10, в) за счет поперечного сокращения металла углового шва.

При сварке стыковых соединений с одной стороны с V-образной разделкой кромок П. П. Трочун [4] рекомендует определять угловую деформацию по формуле

$$\beta = 2 \alpha T_{\text{ср}} \operatorname{tg} \varphi / 2, \quad (1.30)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения металла;  $T_{\text{ср}}$  — средняя температура слоя наплавленного металла к моменту перехода наиболее нагретых точек из пластического состояния в упругое;  $\varphi$  — угол разделки свариваемых кромок.

В ряде случаев при автоматической сварке угол провара может существенно отличаться от угла разделки кромок  $\varphi$  (рис. 1.11). Например, при автоматической сварке без скоса кромок угол  $\varphi = 0$ , но при неравномерном проплавлении металла по толщине проявляется угловая деформация. Это связано с тем, что угол  $\varphi^* \neq 0$ .

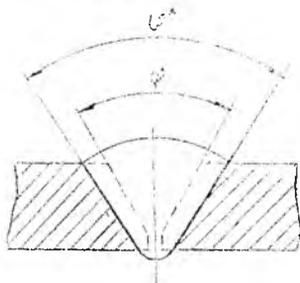


Рис. 1.11. Угол разделки кромок  $\varphi$  и угол провара  $\varphi^*$

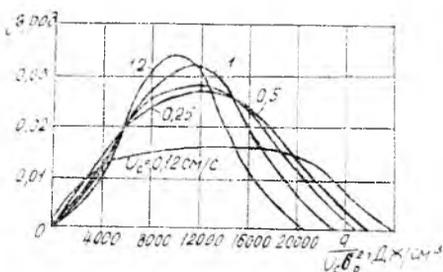


Рис. 1.12. Номограмма для определения угловой деформации при сварке встык

С. А. Кузьминов [5] рекомендует определять угловую деформацию при сварке встык и втавр малоуглеродистых и низколегированных сталей по номограмме (рис. 1.12) [2] в зависимости от условий сварки и расчетной толщины  $S_p$ . На рисунке  $q = \eta u I$  — эффективная мощность сварочной дуги, Вт;  $v_c$  — скорость сварки, см/с;  $S_p$  — расчетная толщина, см, равная при полном проваре толщине листов  $S$ , а при неполном — глубине проваренного слоя (или слоя при многопроходной сварке).

При многопроходной сварке угловую деформацию стыкового сварного соединения определяют по формуле

$$\beta = \sum_{k=1}^i \beta_k m_k - \sum_{s=1}^j \beta_s m_s, \quad (1.31)$$

где  $i$  — число проходов с лицевой стороны;  $j$  — число проходов

с обратной стороны;  $\beta_k$  — угловая деформация от  $K$ -го прохода с лицевой стороны;  $\beta_s$  — угловая деформация от  $S$ -го прохода с обратной стороны;  $m$  — поправочный коэффициент, учитывающий номер прохода (определяют по графику рис. 1.13 [2]).

В случае сварки тавровых соединений угол  $\beta_1$  также находят по номограмме (см. рис. 1.12). Угол  $\beta_2$  свободного поворота поясного листа от поперечной усадки углового шва мало зависит от режима сварки и равен 0,024 рад. При определении  $\beta_1$  по номограмме необходимо учитывать, что расчетной толщиной  $S_p$  является толщина пояса  $S_{II}$ , и в поле вводится количество тепла

$$q_{II} = q \frac{2 S_{II}}{2 S_{II} + S_c} \quad (1.32)$$

При сварке второго углового шва в тавровом соединении поворот поясного листа как жесткого целого относительно стенки невозможен ( $\beta = 0$ ). Однако за счет той же поперечной усадки

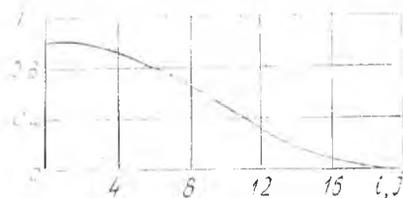


Рис. 1.13. Зависимость поправочного коэффициента  $m$  от числа проходов

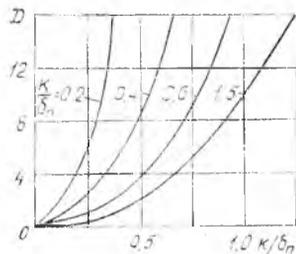


Рис. 1.14. Номограмма для определения коэффициента  $D$

углового шва в направлении гипотенузы поле со стороны второго углового шва повернется на угол  $\beta_k$  (см. рис. 1.10,г [2]):

$$\beta_k = \epsilon_T D, \quad (1.33)$$

где  $\epsilon_T$  — деформация, соответствующая пределу текучести металла;  $D$  — коэффициент, зависящий от величины катета  $K$ , толщины пояса  $S_{II}$  и стенки  $S_c$  (определяют по графику на рис. 1.14 [2]).

## 2. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

### 2.1. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

В производстве летательных аппаратов используют почти все известные способы сварки плавлением, при этом основным является электрическая дуговая сварка. Однако в любом случае

дуга как источник нагрева характеризуется высокой концентрацией выделяемой теплоты, что обуславливает местный крайне неравномерный нагрев свариваемых изделий, а это неизбежно вызывает ряд сопутствующих сварке специфических явлений, например, возникновение сварочных напряжений и деформаций или образование в основном металле вблизи шва зоны с измененной структурой. В связи с этим возникает необходимость определения характера и степени нагрева свариваемого изделия, которое в настоящее время проводится на основе теории распределения тепла при сварке, разработанной академиком Н. Н. Рыкалицыным и другими советскими учеными [6].

Допустим, известно, какое количество теплоты поступает в металл. Необходимо установить, как распределится в нем температура. Задача решается на основе использования методов теории теплопередачи. Теплопередача в твердом теле осуществляется благодаря теплопроводности, определяемой законом Фурье, который гласит: тепловой поток, проходящий через данную площадку, пропорционален градиенту температуры по нормали к этой площадке:

$$q = -\lambda (\partial T / \partial n), \quad (2.1)$$

где  $q$  — удельный тепловой поток, Вт/см<sup>2</sup>;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/см·К;  $\partial T / \partial n$  — градиент температуры, К/см. Знак минус означает, что поток теплоты всегда направлен в сторону убывающей температуры, т. е. по направлению совпадает с отрицательным градиентом.

Если выделить в теле элементарный объем и определить количество теплоты, протекающей через его грани, можно получить известное уравнение теплопроводности в дифференциальной форме

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \rho} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (2.2)$$

где  $\rho$  — плотность металла, г/см<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость металла, т. е. количество теплоты, необходимое для изменения на один кельвин температуры единицы массы тела, Дж/(г·К). Это уравнение часто записывается в виде

$$\partial T / \partial t = a \nabla^2 T, \quad (2.3)$$

где  $a = \lambda / c \rho$  — коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость распространения теплоты, см<sup>2</sup>/с;  $\nabla^2 T$  — оператор Лапласа.

Уравнение теплопроводности по своему физическому существу связывает скорость изменения температуры в данной точке с распределением температуры в ее окрестностях. Очевидно, что

процессы распространения теплоты при сварке должны удовлетворять дифференциальному уравнению теплопроводности и красным условиям, т. е. начальному распределению температуры и условиям теплообмена на границах тела.

### Теплофизические величины и понятия

Температурное поле есть распределение температур в теле в конкретный момент времени. Оно может выражаться как в абсолютной температуре  $T$ , так и в приращении температур  $\Delta T$  по отношению к начальной температуре тела  $T_0$ . В общем случае температурное поле может быть функцией не только координат  $x, y, z$  отдельных точек, но и времени  $t$ :

$$T = T(x, y, z, t). \quad (2.4)$$

Формула (2.4) описывает объемное температурное поле. Оно может быть также плоским  $T = T(x, y, t)$  или линейным  $T = T(x, t)$ .

Удельное количество теплоты (теплосодержания)  $h$  выражает количество теплоты, сообщенное телу массой  $1\text{ г}$  при нагреве его от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ . При технических расчетах теплосодержание тела отсчитывают обычно от нормальной температуры (293 К), а не от абсолютного нуля. Все критических точек теплосодержание в металлах с ростом

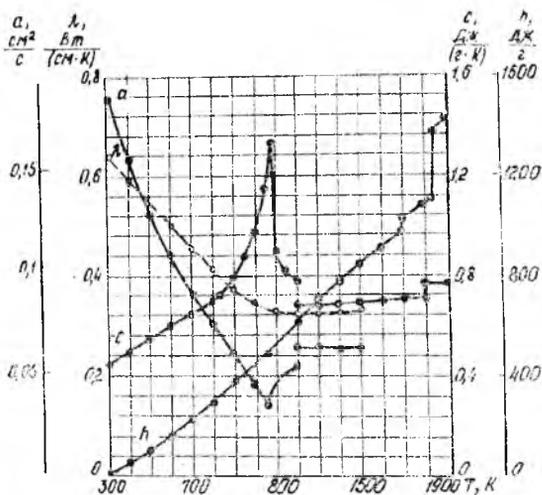


Рис. 2.1. Теплофизические свойства низкоуглеродистой стали с 0,1% C (теплосодержание  $h$ , отсчитываемое от 300 К, истинная теплоемкость  $c$ , теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ )

температуры возрастает монотонно. В критических точках, соответствующих аллотропическим и фазовым превращениям, происходящим с поглощением или выделением теплоты, оно изменяется скачкообразно (рис. 2.1) [7].

Истинная удельная массовая теплоемкость  $c$  есть количество теплоты, необходимое для изменения на один кельвин температуры единицы массы тела (см. рис. 2.1). В расчетах бывает удобно пользоваться средней удельной массовой теплоемкостью в данном интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ :

$$c_m = (h_2 - h_1) / (T_2 - T_1). \quad (2.5)$$

В расчетах может быть использована истинная  $c$  и средняя  $c_m$  удельная объемная теплоемкости, которые связаны с массовой теплоемкостью следующими соотношениями:

$$c = c \rho; \quad c_m = c_m \rho, \quad (2.6)$$

где  $\rho$  — плотность тела в нормальных физических условиях.

Теплопроводность  $\lambda$  характеризует способность тел проводить теплоту. Численно коэффициент  $\lambda$  выражает количество теплоты, протекающее через единицу изотермической поверхности в единицу времени, если изменение температуры по направлению нормали составляет 1 К на 1 см. Теплопроводность металла существенно изменяется в зависимости от температуры и химического состава материала.

Коэффициент температуропроводности  $a$  характеризует скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле, т. е. скорость распространения тепла.

Поверхностная теплоотдача  $\alpha$  — с поверхности металлов теплота передается конвективным путем или посредством радиации. Указанные процессы играют важную роль при сварке: в конечном итоге вся теплота, введенная при сварке, отдается в окружающее пространство, и тела остывают.

Удельный поток полной теплоотдачи можно представить как сумму удельных потоков конвективного и лучистого теплообмена:

$$q_2 = \alpha_k (T - T_c) + \alpha_r (T - T_c) = \alpha (T - T_c), \quad (2.7)$$

где  $\alpha = \alpha_k + \alpha_r$  — коэффициент полной поверхностной теплоотдачи;  $T$  — температура поверхности твердого тела;  $T_c$  — температура среды (жидкости или газа).

Коэффициент  $\alpha_k$  — не постоянная величина, он может изменяться в широких пределах в зависимости от следующих факторов:

свойства окружающей среды (теплопроводность, плотность, вязкость) и ее движение относительно поверхности;

форма поверхности тела и ее положение в пространстве;  
разность температур  $T - T_c$ .

Удельный поток излучения тела пропорционален четвертой степени его абсолютной температуры (закон Стефана-Больцмана):

$$q_{2r} = C_q T_c^4; \quad (2.8)$$

$$C_q = \varepsilon C_0. \quad (2.9)$$

Коэффициент  $C_q$  зависит от состояния поверхности тела и выражается через коэффициент степени черноты тела  $\varepsilon$ . Для абсолютно черного тела  $\varepsilon = 1$ , а  $C_q = U_0 = 56,6 \text{ НВт}/(\text{см}^2 \text{ К}^4)$ .

Большинство встречающихся в технике тел можно рассматривать как серые, у которых  $\varepsilon < 1$ . Значение  $\varepsilon$  зависит от природы тела, характера поверхности сталей и изменяется в пределах от 0,6 до 0,95. У алюминия значение  $\varepsilon$  изменяется в пределах от 0,05 до 0,2 в зависимости от свойств поверхности и температуры. Коэффициент  $\alpha$  значительно изменяется с ростом температуры (рис. 2.2) [7]. При температурах до 400...500 К основная часть теплоты отдается конвективным, при более высоких температурах — лучистым теплообменом.

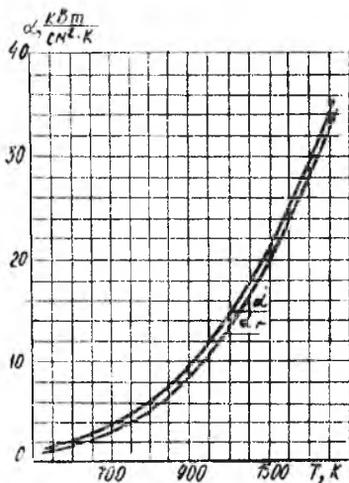


Рис. 2.2. Коэффициенты полной теплоотдачи  $\alpha$  и лучистого теплообмена  $\alpha_r$  вертикальных листов углеродистой стали  $T_c = 273 \text{ К}$

## 2.2. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ СВАРКЕ

В расчетах тепловых процессов при сварке широко используют зависимости, полученные путем схематизации и упрощения действительных процессов распространения теплоты. Эти упрощения в основном сводятся к следующему.

1. Источники теплоты считают либо сосредоточенными, либо распределенными по соответствующему закону, который позволяет относительно просто описать процесс распространения теплоты.

2. Все многообразие форм изделий приводится к одной из трех схем [7]:

а) полубесконечное тело или массивное изделие с одной ограниченной плоскостью  $Z = 0$  (рис. 2.3,а). Этой схеме

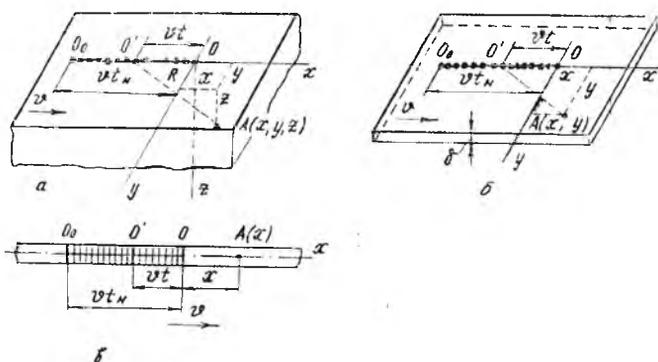


Рис. 2.3. Схема движения непрерывно действующего источника мощностью  $q$ , перемещающегося со скоростью  $V$ : а — точечный на поверхности полубесконечного тела; б — линейный в бесконечной пластине; в — плоский в бесконечном стержне

соответствует массивное изделие, размеры которого значительно развиты в трех пространственных направлениях  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . Поток тепла в таком теле пространственный. Массивное тело, у которого размер по оси  $OZ$  ограничен конечной величиной, называется плоским слоем; распределение температуры по оси  $OZ$  в таком теле остается неравномерным;

бесконечная пластина представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями  $Z = 0$  и  $Z = S$ . При использовании этой схемы всегда предполагают, что температура по толщине листа равномерна, а теплота может распространяться только в плоскости с координатными осями  $X$  и  $Y$  (рис. 2.3,б);

бесконечный и полубесконечный стержни представляют собой тела с прямолинейной или криволинейной осью и поперечным сечением относительно малых размеров, значительно развитым только в одном направлении (рис. 2.3,в); температура в пределах поперечного сечения стержня равномерна.

Помимо названных в практике расчетов используют также и другие простейшие схемы, например, сплошной цилиндр, тонкостенный цилиндр, тонкостенные оболочки.

3. Теплофизические коэффициенты  $\lambda$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $\alpha$  значительно меняются с изменением температуры (см. рис. 2.1). Учет зави-

симости этих коэффициентов от температуры приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям, что чрезвычайно усложняет решение аналитическими методами. Для технических целей в ряде случаев точность решения оказывается достаточной, если выбирать среднее их значение (табл. 2.1) [7] в диапазоне температур, характерном для рассматриваемого процесса.

Таблица 2.1

Расчетные коэффициенты для различных металлов и сплавов

Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(см·К)	Объемная теплоемкость $c_p$ , Дж/(см <sup>3</sup> ·К)	Коэффициент температуропроводности $a$ , см <sup>2</sup> /с
Малоуглеродистые и низколегированные стали	0,38	4,8	0,08
Хромоникелевая аустенитная сталь	0,25	4,7	0,053
Медь	4,0	4,2	0,95
Латунь	1,17	3,45	0,34
Алюминий	2,7	2,7	1,0
Технический титан	0,17	2,8	0,06

4. Необходимо обговорить также условия теплообмена. Так как тепло в массивном изделии быстро отводится внутрь изделия, принимается, что теплообмен с окружающей средой (по плоскости  $Z = 0$ ) отсутствует. Для пластины теплообмен учитывается, если толщина ее меньше 3...5 мм, а для стержня теплообмен учитывается во всех случаях.

5. В расчетных схемах предполагается, что источник сосредоточен: в массивном изделии (см. рис. 2.3,а) — в элементарном объеме  $dx, dy, dz$ , т. е. как бы в геометрической точке в центре дугового пятна (точечный источник); в пластине (см. рис. 2.3,б) — в элементарной призме конечной высоты  $dx, dy, s$  (линейный источник); в стержне (см. рис. 2.3,в) — в элементарном объеме  $Fdx$ , где  $F$  — площадь сечения стержня (плоский источник).

Такое допущение не позволяет вести расчет процессов распространения тепла в области, прилегающей непосредственно к дуге в начальном периоде процесса, т. е. после непосредственного введения тепла дуги (принцип местного влияния). Однако расчетные схемы, построенные с учетом указанных допущений, позволяют с достаточной для практики точностью вести расчеты процессов распространения тепла при сварке для области, лежащей вне шва.

Кроме указанных условий при создании расчетной схемы принимается, что тепловой источник может быть мгновенно или непрерывно действующим, а также неподвижным, подвижным и быстро движущимся; в двух последних случаях считается, что источник движется равномерно.

В производстве летательных аппаратов для изготовления сварных узлов используются в основном материалы малой толщины с преимущественным применением электрической дуговой сварки. Рассмотрим приращение температуры линейного источника теплоты мощностью  $q$  с равномерным распределением по толщине пластины и движущимся с постоянной скоростью  $v$  (см. рис. 2.3,б). Граничные плоскости  $Z = 0$  и  $Z = S$  отдают теплоту в окружающую среду, температуру которой  $T_c$  принимаем равной начальной температуре тела  $T_n$ .

Уравнение, описывающее приращение температур в точке  $A$  от мгновенного линейного источника теплоты, который действовал в точке  $O'$ , имеет вид

$$dT = \frac{q dt}{S c \rho (4 \pi a t)} e^{-\frac{(x+v t)^2 + y^2}{4 a t} - b t} \quad (2.10)$$

Интегрируя его от 0 до  $t_n$  и преобразовывая, получаем

$$\Delta T = \frac{q}{4 \pi \lambda S} e^{-z x / 2 a} \int_0^{t_n} e^{-\left(\frac{v^2}{4 a} + b\right) t - \frac{r^2}{4 a t}} \frac{d t}{t}, \quad (2.11)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ ;  $b = 2 \alpha / c \rho S$ .

Уравнение (2.11) выражает приращение температур в пластине в стадии теплонасыщения. Предельное квазистационарное состояние достигается при  $t_n \rightarrow \infty$ . В этом случае уравнение (2.11) интегрируется и принимает вид

$$\Delta T_{np} = \frac{q}{2 \pi \lambda S} e^{-z x / (2 a)} K_0 \left( \frac{v r}{2 a} \sqrt{1 + \frac{4 b a}{v^2}} \right). \quad (2.12)$$

где  $K_0$  — функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка.

*Предельное состояние.* При нагреве пластины линейным источником теплоты распределение температуры по ее толщине согласно уравнению (2.12) равномерно. Следует, однако, иметь в виду, что в действительности из-за наличия теплоотдачи с поверхности пластины всегда наблюдается некоторая неравномерность распределения температуры по ее толщине. Эта неравномерность будет тем значительнее, чем больше величина  $4 b a / v^2$ . Кроме того, при расчете температуры с учетом теплоотдачи коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  принимался не зависящим от температуры и имел некоторое среднее значение. Физически это означает, что в области высоких температур теплоотдача на

самом деле будет происходить интенсивнее, а в области низких температур слабее, чем получается из расчета.

Картины распределения приращения температуры в пластине (рис. 2.4) [7] и в плоскости XOY массивного тела качествен-

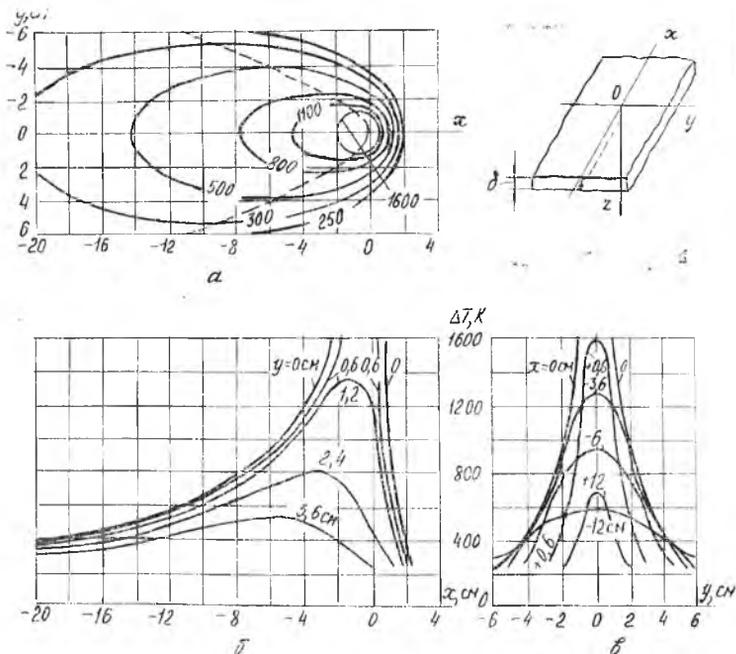


Рис. 2.4. Приращение температур в предельном состоянии при движении линейного источника теплоты в бесконечной пластине: [ $q=4000$  Вт,  $V=0,1$  см/с,  $S=1$  см,  $a=0,1$  см<sup>2</sup>/с,  $\lambda=0,4$  Вт/(см·К),  $b=2,8 \cdot 10^3$  л/с]: а — изотермы на поверхности пластины (штриховая кривая — точки с максимальными температурами); б — распределение приращений температуры в сечениях, параллельных оси  $x$ ; в — распределение приращений температуры в сечениях, параллельных оси  $y$ ; г — схема координатных осей

но имеют много общего. Отличие заключается в том, что изотермы в пластине еще более вытянуты, чем в полубесконечном теле. Степень вытянутости изотерм зависит не только от условий сварки и теплофизических свойств материала, но и от теплоотдачи в воздух.

Максимальная температура в точке на расстоянии  $y_0$  от оси линейного источника, быстро перемещающегося по поверхности пластины, выражается по теории Н. Н. Рыкалина [6] формулой

$$T_m(y_0) = \frac{\eta_l q_{\text{эф}}}{v_{\text{св}} c \rho S 2y} \left( 1 - \frac{by_0^2}{2a} \right), \quad (2.13)$$

где  $q_{эф} = \eta_t I$ ,

$\eta_t$  — термический КПД процесса проплавления основного металла,

$$\eta_t = \frac{v F_{пр} \rho S_{пл}}{q}$$

КПД  $\eta_t$  выражает отношение условного теплосодержания  $v F_{пр} \rho S_{пл}$  проплавленного за единицу времени основного металла к эффективной тепловой мощности дуги или пламени. Здесь  $v$  — скорость сварки,  $F_{пр}$  — поперечное сечение проплавленной зоны или прогрева заданной зоны металла выше температуры  $T_{пл}$ , которой соответствует теплосодержание  $S_{пл}$  (Дж/г), включающее скрытую теплоту плавления.

Коэффициент  $\eta_t$  характеризует эффективность использования тепловой энергии, введенной подвижным сосредоточенным источником для местного прогрева, и определяется процессом распространения тепла по металлу вследствие теплопроводности.

Термический КПД  $\eta_t$  прогрева линейным быстродвижущимся источником выражается отношением площади заштрихованного прямоугольника к площади изохроны, в которую вписан этот прямоугольник (рис. 2.5) [8],  $\eta_t = \sqrt{2/\pi e} = 0,484$ .

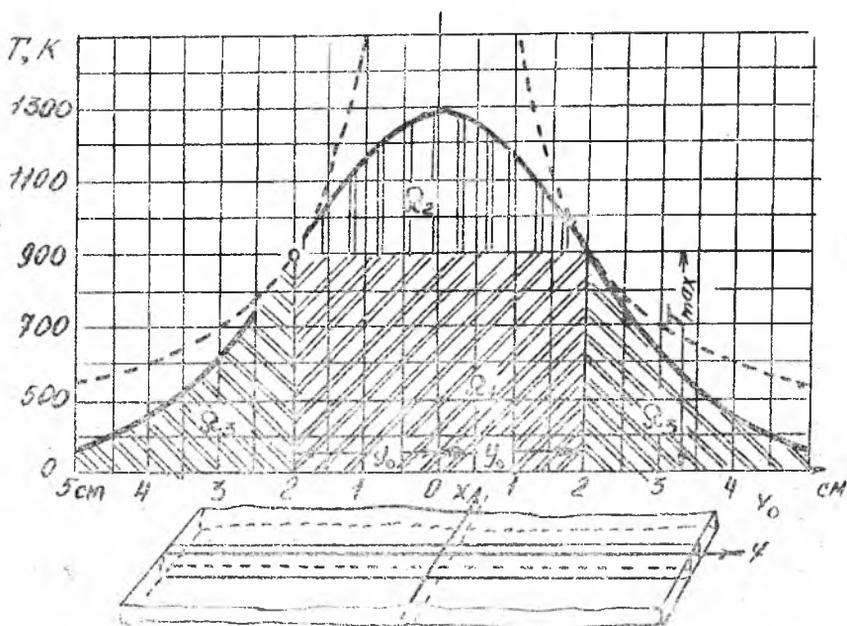


Рис. 2.5. Мгновенное распределение тепла в поперечном элементе бесконечной пластины, определяющее прогрев зоны шириной  $2y_0$  до температуры  $T_m(y_0)$

Коэффициент теплоотдачи, учитывающий интенсивность понижения температуры пластины при теплоотдаче в окружающую среду:  $b = \frac{2\alpha'}{c\rho S}$ ,

где  $\alpha'$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/см<sup>2</sup>·град;  $a = \lambda/c\rho$  — коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/см·град;  $c\rho$  — объемная теплоемкость, Дж/см<sup>3</sup>·град.

Эффективный КПД процесса нагрева изделия сварочной дугой зависит главным образом от условий ее горения. Коэффициент  $\eta_u$  уменьшается с увеличением длины дуги и повышается с увеличением скорости сварки и углублением дуги в сварочную ванну. Повышение  $\eta_u$  при углублении дуги в сварочную ванну связано с улучшением теплообмена между дугой и изделием, а также с уменьшением потерь тепла разбрызгивающимся материалом. В дугах, мало погруженных в металлы изделия, скорость плавления электродов не зависит от длины дуги. Это значит, что плавление происходит главным образом за счет энергии, получаемой электродами от прилегающих к ним областей дуги потенциальной энергии электронов. В этих случаях КПД дуги приближенно может быть найден из соотношения  $\eta_u = (U_k + U_a)/U$ , где  $U_k$ ,  $U_a$ ,  $U$  соответственно падение напряжения в катодной области, анодной и общее падение напряжения дуги.

Дуги, сильно погруженные в металлы изделия (например, при сварке под флюсом, сварке по узкощелевому зазору), нагревают и плавят металл частично и энергией столба  $\Delta U_c$ , поэтому их КПД составляет

$$\eta_u = \frac{U_k + U_a + U_c}{u}$$

При полном погружении дуги, когда потери излучения столба возможны только через зазоры между поверхностью ванны и стержневым электродом, КПД оценивается примерно в 0,75...0,85, в то время как при сварке вольфрамовым электродом в аргоне он составляет 0,48...0,52, а при сварке плавящимся электродом в аргоне — 0,68...0,74.

Для оценки термического влияния на свариваемый металл бывает необходимо определить ширину  $2l$  зоны, приращение температуры которой выше заданного  $\Delta T_l$  (рис. 2.6) [7]. В общем случае ширина зоны нагрева выше  $\Delta T_l$ , равная  $2l$ , будет найдена, если определить координату  $Y$  точки  $A$ . Точка  $A$ , во-первых, находится на изотерме  $n$ , следовательно,  $\Delta T = \Delta T_l$ , во-вторых, в точке  $A$  достигается максимальное приращение температуры на расстоянии  $y = e$ , т. е.  $\partial T/\partial x = 0$ .

На рис. 2.7 [7] показана номограмма для определения ширины зоны нагрева при сварке пластины линейным источником

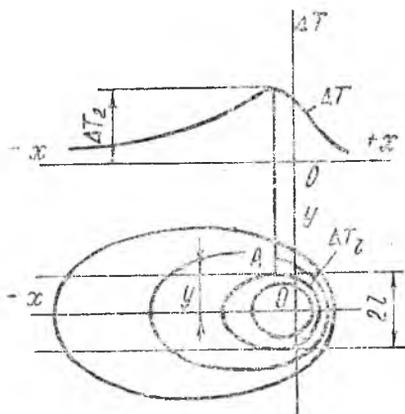


Рис. 2.6. Схема определения ширины  $2l$  зоны, приращение температуры в которой превосходило  $\Delta T_l$

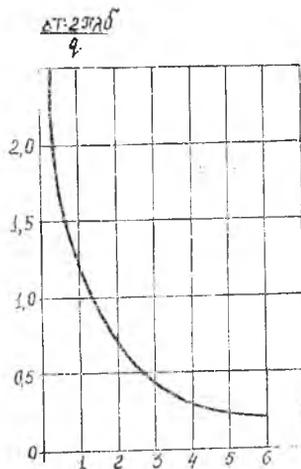


Рис. 2.7. Помограмма для определения ширины зоны нагрева  $2l$  движущимся источником теплоты

в случае  $b = 0$ . Для мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине ширина зоны термического влияния определяется по формуле

$$2l = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi c}}}{v \rho S \Delta T_l}$$

### 2.3. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СВАРКИ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА НА ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР

С увеличением скорости  $v$  при  $q = \text{const}$  зоны, соответствующие определенным приращениям температур, например  $\Delta T = 600 \text{ K}$  уменьшаются по ширине и длине (рис. 2.8,а) [7]. Если пренебречь коэффициентом температуропотдачи (2.12), то окажется, что уменьшение длины и ширины зон происходит прямо пропорционально увеличению скорости сварки.

С возрастанием мощности источника теплоты  $q$  длина и ширина зон, нагретых выше определенной температуры, увеличиваются быстрее, чем мощность источника. Увеличение длины зон идет быстрее, чем ширины (рис. 2.8,б). Одновременное увеличение мощности источника теплоты и скорости сварки при постоянной погонной энергии сварки  $q/v$  приводит в основном

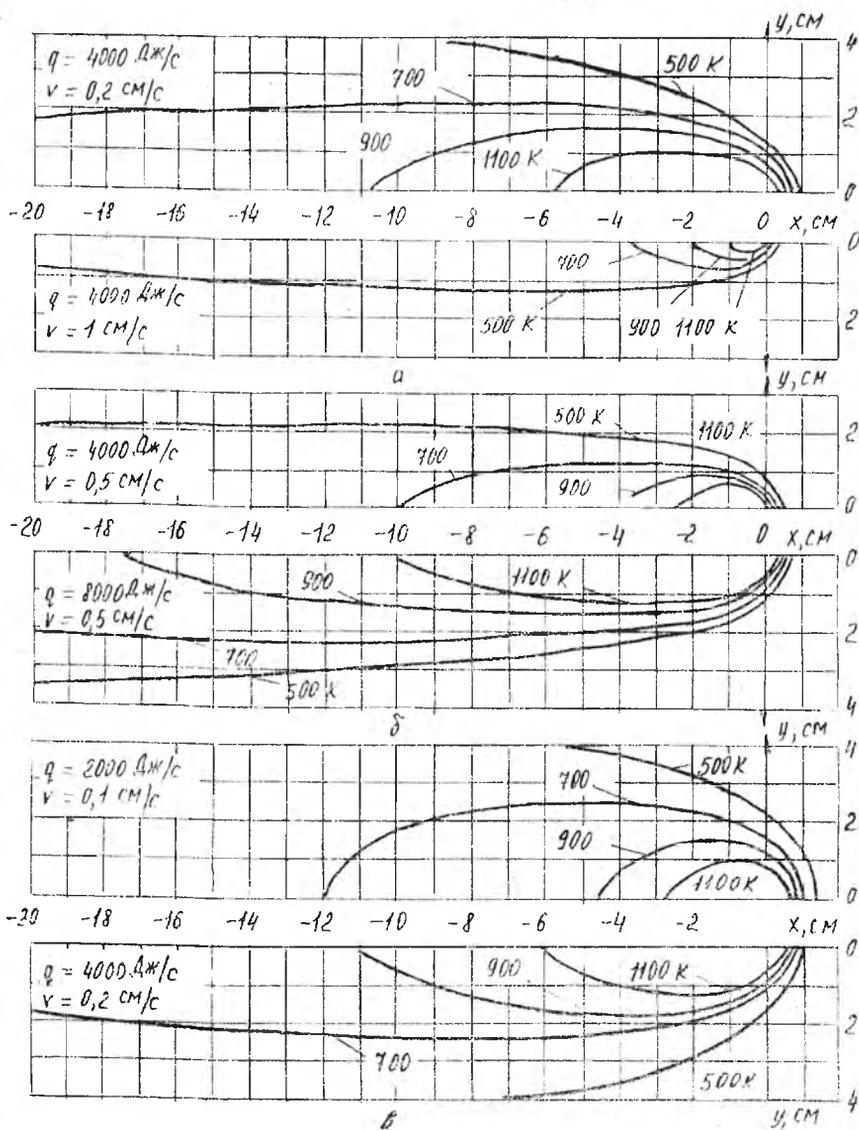


Рис. 2.8. Влияние режима сварки на температурное поле предельного состояния в стальной пластине

к увеличению длины зоны. Ширина зон также увеличивается, но стремится к определенному значению (рис. 2.8,в).

Из всех теплофизических свойств металла наиболее заметное влияние на распределение температур оказывает теплопроводность  $\lambda$ . Увеличение  $\lambda$  при прочих равных условиях примерно соответствует случаю одновременного уменьшения мощности и скорости при постоянной погонной энергии сварки. Зоны, охватываемые изотермами (в дальнейшем для краткости просто «зоны»), сильно укорачиваются и несколько сужаются. В качестве примера можно сравнить между собой низкоуглеродистую и аустенитную стали, у которых теплоемкости примерно одинаковы, а теплопроводность различная (рис. 2.9,а,б; табл. 2.1). У меди и алюминия, обладающих высокой теплопроводностью, изотермы в области высоких температур близки к окружностям (рис. 2.9,в,г).

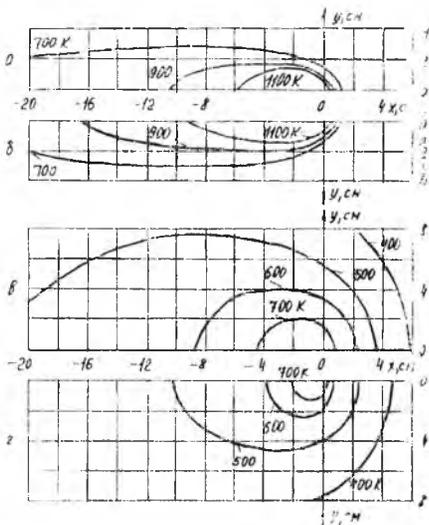


Рис. 2.9. Влияние теплофизических свойств материала (см. табл. 2.1) на характер температурного поля в пластине толщиной 1 см ( $q = 4,2$  кВт,  $V = 0,2$  см/с)

Увеличение теплоемкости металла  $c\rho$  оказывает примерно такое же влияние, как увеличение скорости сварки при постоянной мощности. С увеличением теплоемкости металла при прочих равных условиях зоны укорачиваются и сужаются.

Мгновенная скорость охлаждения при данной температуре металла шва и прилегающей околосшовной зоны  $\omega$  является первой производной температуры по времени

$$\omega = \partial T / \partial t, \quad (2.14)$$

при односторонней сварке пластины встык с учетом начальной температуры

$$\omega = -2 \lambda c \rho \frac{(T - T_0)^3}{(\rho / v S)^2}, \quad (2.15)$$

т. е. скорость охлаждения при температуре  $T$  пропорциональна кубу разности  $T - T_0$  и обратно пропорциональна квадрату удельных тепловложений  $q/vS$ .

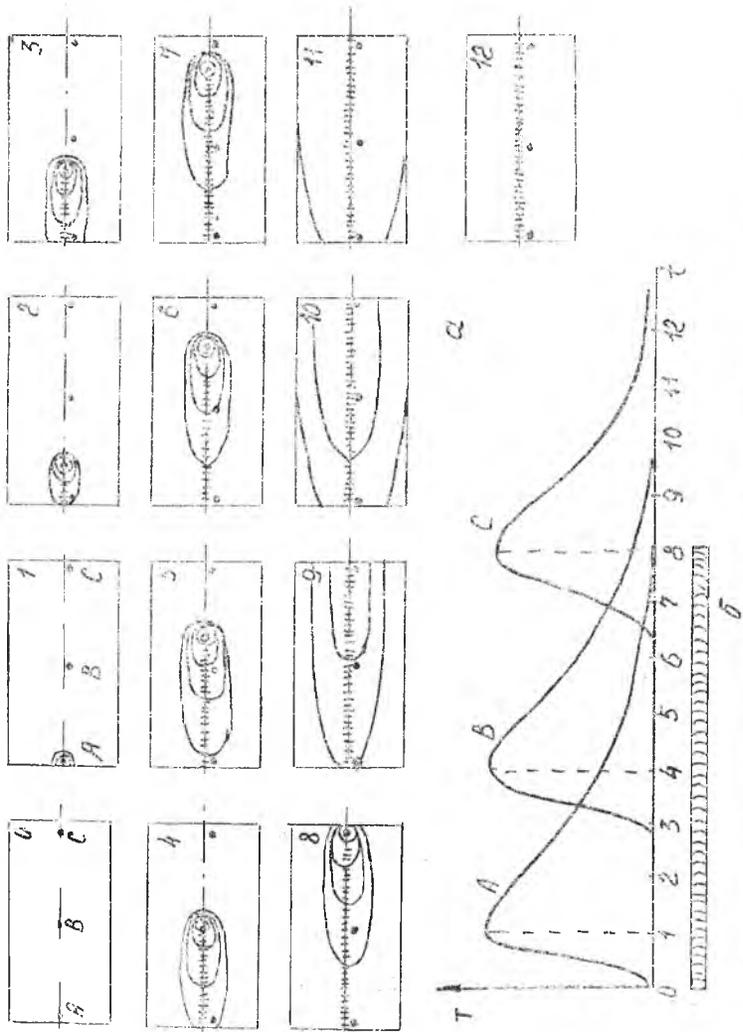


Рис. 2.10. Процесс распределения тепла при сварке листов встык: а — мгновенные температурные поля для моментов времени 0..12; б — измененные температуры в точках А, В и С со временем

Длительность пребывания металла шва выше заданной температуры

$$t = \frac{1}{4\pi a(T - T_0)^2} (q/vSc\rho)^2. \quad (2.16)$$

*Термический цикл и максимальные температуры.* Температура любой точки тела по мере приближения к ней температурного поля начинает повышаться, достигает определенного максимума и при дальнейшем перемещении температурного поля начинает понижаться, стремясь к температуре окружающей среды. Такое изменение во времени температуры данной точки тела называется термическим циклом. Графически термический цикл показан на рис. 2.10.

При длительном действии источника тепла в процессе нагрева — остывания изделия или его элементов различают три периода:

- начальный — теплонасыщение;
- установившегося или предельного распространения тепла;
- охлаждения или выравнивания температуры.

Начальному периоду времени действия источника тепла соответствует неустановившееся температурное поле. В этот отрезок времени непрерывно увеличиваются размеры нагреваемой области и повышается температура каждой ее точки, стремясь достичь предельного значения.

С течением времени происходит насыщение металла теплом, стабилизируются размеры нагретой области и температуры отдельных точек этой области. Вокруг источника тепла устанавливается температурное поле постоянных параметров, передвигающееся вместе с источником. Это предельное состояние нагрева сохраняется до момента прекращения действия источника тепла.

### 3. ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ЛА И ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТАДИИ СБОРОЧНО-СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

#### 3.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Проектируя конструкции, необходимо отдельные ее сварные узлы разрабатывать с учетом применения прогрессивных методов сварки, снижения концентрации напряжений в сварных

соединениях, а также с учетом получения минимальных остаточных деформаций отдельных узлов и конструкции в целом, снижать затраты на изготовление, обеспечить безопасную эксплуатацию конструкции.

При выборе технологического процесса изготовления конструкции необходимо предварительно рассмотреть различные варианты последовательности соединения элементов сварной конструкции с целью нахождения таких вариантов, которые приведут к минимальным геометрическим отклонениям. На основании такой предварительной оценки ожидаемых сварных деформаций могут быть внесены изменения в сварную конструкцию, а также установлены мероприятия, позволяющие обеспечить точность в процессе изготовления за счет предварительных деформаций и припусков на укорочение.

При проектировании сварных конструкций необходимо обеспечить минимальный уровень концентрации напряжений в сварных соединениях, для чего следует избегать лобовых, фланговых швов, резких переходов в зоне сопряжения соединяемых деталей и т. п. Более детальные рекомендации по данному вопросу приведены в монографиях [9, 10, 11, 12].

Выбор взаимного пространственного положения сварных швов также является весьма ответственным моментом. Минимальные остаточные сварочные деформации (перемещения) сварной конструкции обеспечиваются в том случае, когда сумма статических моментов объема сварных соединений относительно центра тяжести всего сечения (конструкции) равна или близка к нулю. Для этого необходимо стремиться к симметричному расположению сварных соединений. В случае сварки асимметричных сечений статические моменты сварных соединений можно уравнивать, изменяя по возможности длину швов.

Для обеспечения же размерной стабильности, наряду с минимумом остаточных деформаций, нужно уже на стадии проектирования строго регламентировать очередность наложения сварных швов, поскольку переменная технологическая жесткость при соединении элементов конструкций соизмеримых размеров может существенно влиять на напряженно-деформированное состояние сварного соединения и конструкции в целом, а следовательно и на размерную стабильность.

Под переменной технологической жесткостью подразумевается последовательное изменение жесткости конструкции (узла) по мере ее сборки и сварки в ходе технологического процесса. На рис. 3.1 [13] приведена схема трех вариантов сборки и сварки двутавра (сборка на прихватках опущена, так как последние несущественно изменяют жесткость).

При сборке и сварке узла по варианту I за счет в два раза меньшей, по сравнению с жесткостью узла, жесткости (по  $h$ ) свариваемых по отдельности узлов, в поясных швах тавров сжимающие напряжения будут выше, чем в варианте III. При сборке и сварке узла по варианту II сжимающие напряжения в первоначально свариваемом тавре будут выше, чем в последующем. При варианте III напряжения сжатия в обоих поясных швах тавров минимальны и близки по величине.

Таким образом, наилучшим является вариант II, поскольку из-за разнотенности зон закалки поясных сварных швов для него характерно максимальное деформирование во времени.

Из вариантов I и III сложно выбрать наилучший, поскольку в первом из них наиболее высокий уровень сжимающих напряжений в стыковом сварном соединении в существенной мере компенсируется равнонапряженностью сварных узловых швов, в то время как для варианта III, отличающегося некоторой асимметрией полей напряжений (снижающейся по мере увеличения  $h$ ), характерен меньший уровень последних.

Точность конструкции, достигаемую при различных вариантах изготовления, можно в некоторых случаях приближенно установить на основании расчетного определения деформаций [10, 14--16]. Однако для многих видов конструкций предварительная оценка степени сварочных деформаций не позволяет их предотвратить с помощью доварочных конструктивно-технологических мероприятий. Такие конструкции требуют послесварочной правки, и разработка механизированных методов восстановления их проектных форм и размеров имеет в этих случаях большое практическое значение.

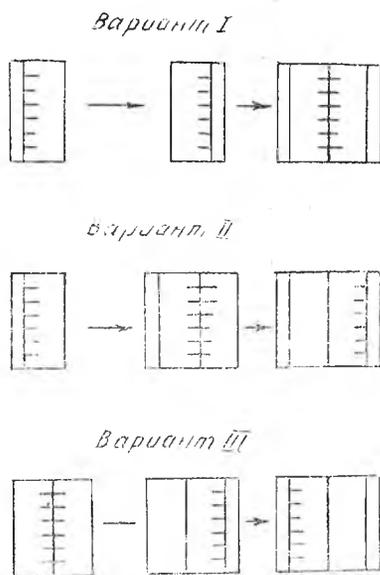


Рис. 3.1. Варианты последовательности сборки и сварки составного двутавра

### *3.2. МЕТОДЫ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ РАЗМЕРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА*

При разработке технологического процесса сборки-сварки прецизионных конструкций наряду с безусловным обеспечением выполнения требований проектно-конструкторской технологической документации необходимо предусматривать дополнительные мероприятия, направленные на повышение размерной стабильности.

К таким чисто технологическим предупредительным мероприятиям могут быть отнесены следующие.

1. Предварительный подогрев сварного соединения или всей конструкции с целью уменьшения температурных градиентов и, как следствие, временных температурных напряжений и скоростей охлаждения при сварке, а значит, достижения после полного охлаждения меньшего уровня остаточных напряжений и более стабильной структуры.

2. Сопутствующий подогрев сварного соединения или конструкции (элемента), если предварительный подогрев недостаточно эффективен.

3. Четкая оптимизация параметров режимов сварочного процесса.

4. Правильный выбор типа предварительной разделки кромок для уменьшения поперечной усадки сварного соединения.

5. Искусственное создание перед сваркой в зоне будущего соединения полей напряжений путем упругого или упруго-пластического предварительного деформирования соединения, отдельных элементов или всей конструкции в целом.

6. Использование в случае целесообразности жестких зажимных сборочно-сварочных приспособлений.

Подводя итог анализа возможных путей предупреждения размерной нестабильности конструкции, следует заметить, что необходима высокая культура производства. В противном случае эффективность всех закладываемых в проектно-конструкторскую, технологическую и другую техническую документацию предупредительных мероприятий и методов может быть сведена к минимуму. Культура производства должна быть не только на этапе сборки-сварки, а и во всем технологическом цикле изготовления отдельных деталей и узлов.

К основным показателям культуры производства относятся: строгое соблюдение технологического процесса в целом; оснащенность производства современным оборудованием и оснасткой;

высокая квалификация рабочего персонала, соответствующая сложности конкретной операции;

строгое соблюдение наряду с технологической и производственной дисциплины.

### 3.3. ПРОДОЛЬНЫЕ, ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ, КОЛЬЦЕВЫЕ И ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ШВЫ

Основными несущими и емкостными элементами изделий ЛА являются тонкостенные оболочки (рис. 3.2) [9]. Чаще всего применяют сферические, цилиндрические, конусные, торондальные

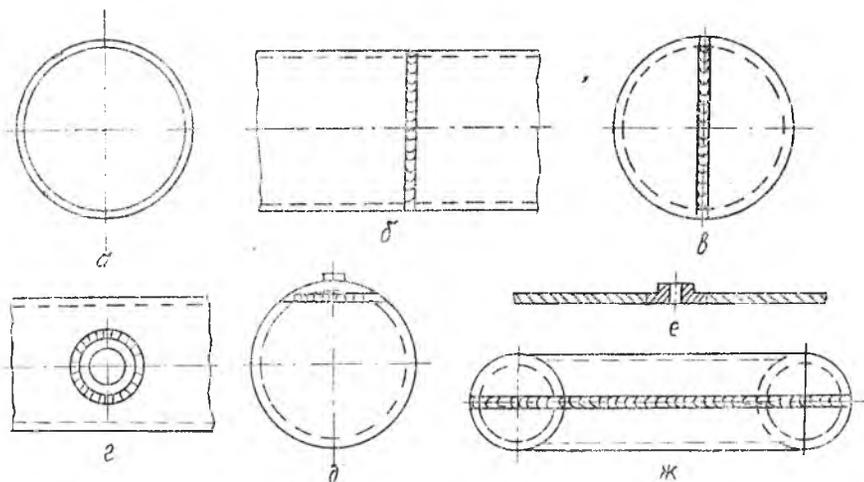


рис. 3.2. Простейшие типы сварки стыковых соединений в элементах оболочки: а, б — продольный и кольцевой шов в цилиндрической оболочке; в — кольцевой шов в сферической оболочке; г — круговые швы в цилиндрической оболочке; д — то же, в сферической оболочке; е — то же, в плоском листе; ж — кольцевой шов в торовой оболочке

оболочки. Основной вид сварного соединения в оболочках — стыковой, выполняемый, как правило, дуговой сваркой в защитных газах и сваркой электрошным лучом в вакууме. Типы сварных швов, которыми соединяются между собой элементы оболочек — продольные прямолинейные (в цилиндрических и конических оболочках), кольцевые, экваториальные, меридиональные, круговые криволинейные (в цилиндрических, конических и сферических оболочках).

Большинство вопросов, связанных с использованием автоматизированных и механизированных технологических процессов сварки оболочек, удовлетворительно решается специалистами-

ми на основании опыта, накопленного при изготовлении листовых элементов и конструкций. Для тонких оболочек характерны повышенные требования как к форме поверхности оболочек после сварки, так и к несущей способности соединений в конструкциях. Установлено, например, что даже незначительные геометрические отклонения стыкуемых кромок вызывают заметное снижение прочности при статических нагрузках. Диапазон размеров оболочковых конструкций чрезвычайно велик. К категории тонких можно отнести такие, у которых отношение радиуса кривизны поверхности к толщине, по крайней мере, больше 100. В таких оболочках возможны значительные перемещения поверхности уже в процессе сварочного нагрева [14, 17]. Эти перемещения осложняют ведение сварки, ухудшают качество и внешний вид шва, снижают несущую способность конструкции. Часто перемещения, образовавшиеся при сварке, бывает трудно, а порой и невозможно устранить методами послесварочной обработки. Иногда для устранения деформаций и перемещений одинаковых сварных швов в оболочках из различных материалов требуются совершенно различные методы. Например, при сварке на подкладном кольце экваториальных швов сферических и кольцевых цилиндрических тонких оболочек может происходить как сокращение длины зоны сварного шва (оболочки из сталей и титановых сплавов), так и удлинение этой зоны (оболочки из алюминиевых сплавов), что отображено на рис. 3.3 [12].

Необходимое для исправления такой деформации уменьшение линейных размеров зоны шва в окружном направлении с помощью прокатки роликами получить практически трудно, а обычно применяемая ручная правка малоэффективна и может сопровождаться значительными местными деформациями.

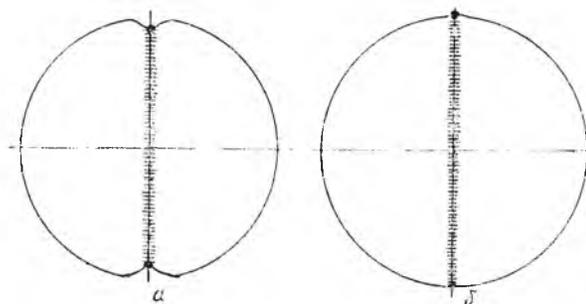


Рис. 3.3. Характер остаточных перемещений тонкой сферической оболочки при сварке экваториальных швов: а — стальные и титановые оболочки; б — оболочки из алюминия

Для разработки мероприятия по предотвращению перемещений в зоне кольцевого шва необходимо ясно представлять процесс его возникновения. Заслуживают внимания эксперименты по измерению временных перемещений поверхности оболочек

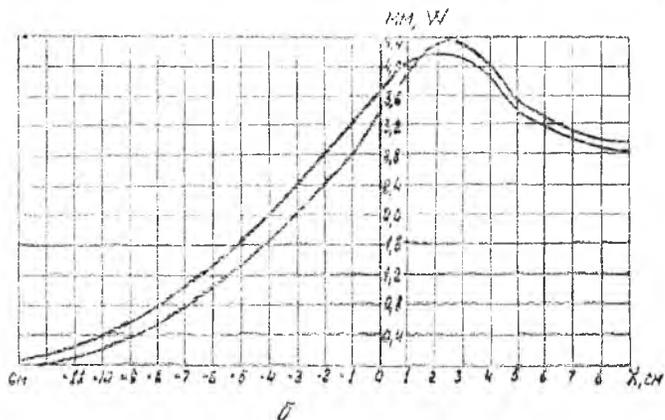
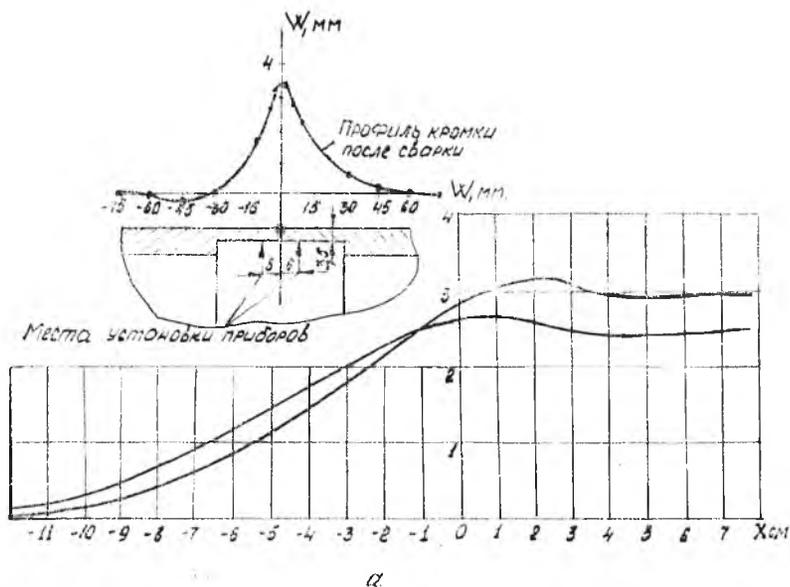


Рис. 3.4. Перемещение кромок в процессе сварки кольцевых швов цилиндрических оболочек из АМгб толщиной 3,5 мм (а) и 2,5 мм (б)

из алюминиевых сплавов в зоне кольцевого шва непосредственно в процессе сварки. Для непрерывной записи перемещений свариваемых кромок в качестве датчиков использовались индукторные головки тензометрического типа. Их пожки через отверстия, специально просверленные в подкладном кольце, опирались на внутреннюю поверхность свариваемых оболочек по

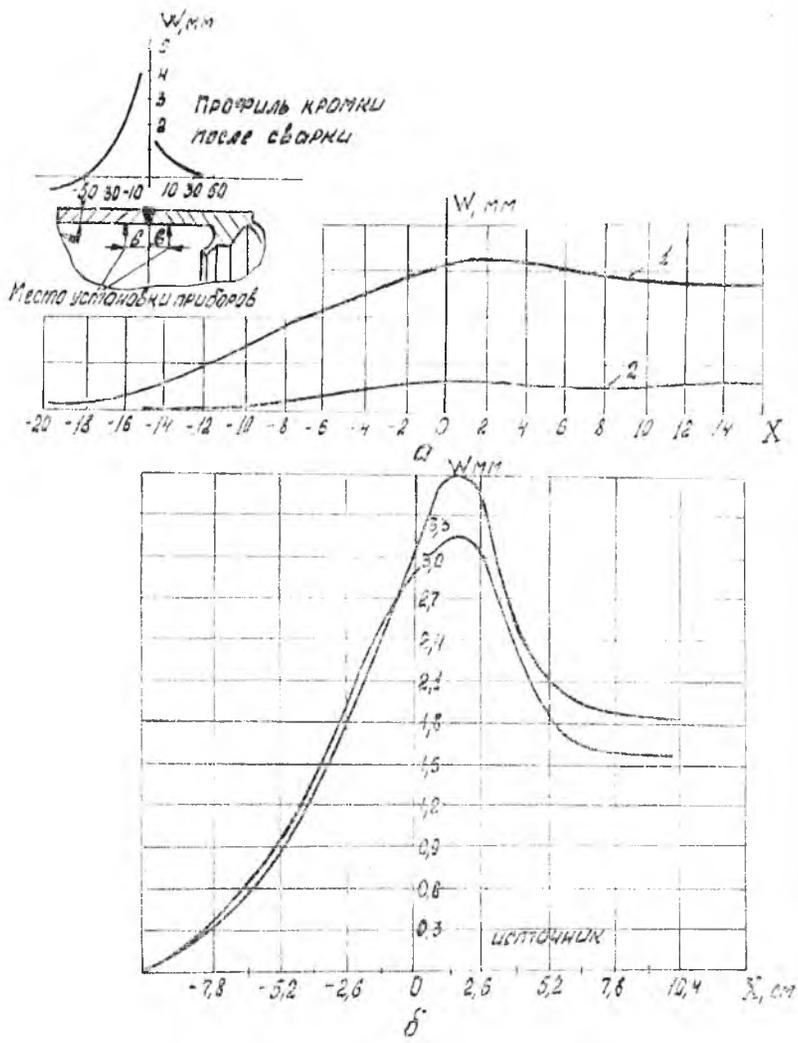


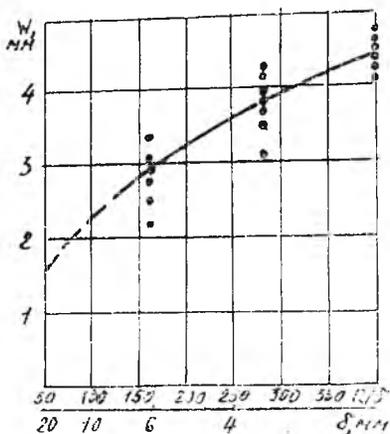
Рис. 3.5. Перемещение кромок в процессе сварки кольцевых швов оболочки со шпангоутом (а) и при сварке с наружными бандажами (б)

обе стороны от стыка [17]. Измерения были проведены на оболочках диаметром 600...1100 мм и толщиной 2,5...10 мм. Диаграммы перемещений кромок, записанные при выполнении аргоно-дуговой сваркой шва без присадки, приведены на рис. 3.4 и 3.5.

Свободные, еще не сваренные кромки начинают отходить от подкладного кольца на некотором расстоянии перед сварочной ванной. Это перемещение достигает максимальной величины в зоне дуги, фиксируется образованием сварного соединения и в процессе охлаждения почти не уменьшается.

Еще более неблагоприятный характер приобретают деформации кольцевого шва в случае, когда жесткость свариваемых кромок различна. Как видно из рис. 3.5, кромка, сдерживаемая жесткостью днища или шпангоута, имеет перемещение меньшее, чем кромка гладкой оболочки. Как следует из профилеграмм, относительное смещение кромок сохраняется в процессе остывания и требует исправления, так как при нагружении концентрации напряжений и деформаций от изгиба может вызвать значительное понижение конструкционной прочности сосуда [10]. Решающее значение в формировании перемещений имеет нагревающая зона, ибо соединение сварной кромки осуществляется уже в приближенном положении.

В зависимости от жесткости и габаритных размеров оболочек перемещение кромок в процессе



сварки может достигать величин, в 2—3 раза превышающих толщину. При прочих равных условиях (погонная удельная энергия, радиус кривизны оболочки) с уменьшением толщины оболочки растет величина остаточных радиальных перемещений (рис. 3.6,а). При этом значение  $w$  радиального перемещения после сварки для оболочек различной толщины находится приблизительно в прямой зависимости от  $\sqrt{R/S}$  ( $R$  и  $S$  — радиус и толщина оболочки).

Размеры зон, приподнимающихся над подкладным кольцом, при сварке в оболочках различной толщины можно характеризовать секториальным углом, внутри которого наблюдается отход кромок от подкладного кольца. Толщина оболочки не оказывает влияния на размеры приподнимающейся при нагреве зоны (рис. 3.6,б), а лишь сказывается на абсолютной величине перемещения.

Некоторое снижение деформаций происходит при сварке с пружинными бандажами, которые оказывают не только удерживающее механическое воздействие на кромки, но и способствуют теплоотводу от места сварки, о чем свидетельствует уменьшение длины деформирующейся зоны впереди источника. Однако необходимость обеспечения доступа к свариваемым кромкам ограничивает возможность их закрепления. Наружные бандажи приходится располагать на определенном расстоянии от кромок ( $\sim 30$  мм), в результате чего перемещения последних предотвращаются частично. Наиболее эффективным способом предотвращения перемещений при сварке кольцевых швов оказывается прижатие кромок к подкладному кольцу роликом (рис. 3.7,а) [12], перекатывающимся по поверхности стыка непосредственно перед сварочной дугой. Подобный прием закрепления кромок был эффективно использован при сварке стыкового шва тонких стальных листов.

Давление, передаваемое на ролик, создается пружинным механизмом. Прижимное устройство монтируется на стандартном консольном автомате, например АКР-2. Приспособление имеет такую схему передачи усилия на ролик, при которой не возникает крутящий момент в консоли автомата и эксцентриситет в прижимном ролике. Приспособление устанавливается вдоль консоли, и нагрузка, воспринимаемая консольно, передается только по плоскости ее продольной оси. Для прижатия кромок рекомендуется применять двойной ролик (рис. 3.7,а) диаметром 23...35 мм. Точка прижатия должна находиться на расстоянии 30...35 мм от оси электрода.

С помощью изготовленного приспособления были сварены обечайки (диаметром 2000 мм, толщиной 2,5; 4 и 6 мм) как с присадочной проволокой, так и без нее. Возможность сварки

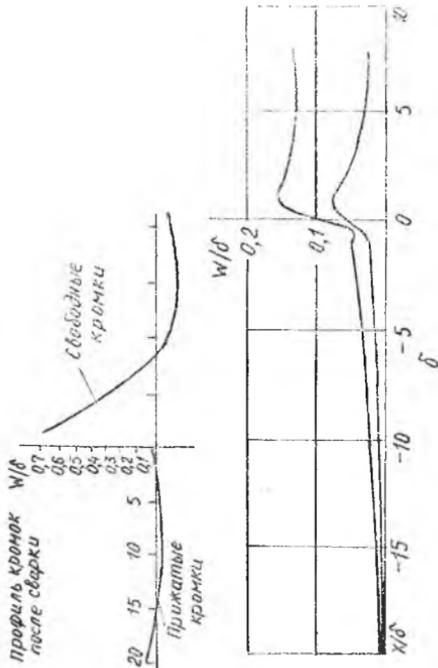
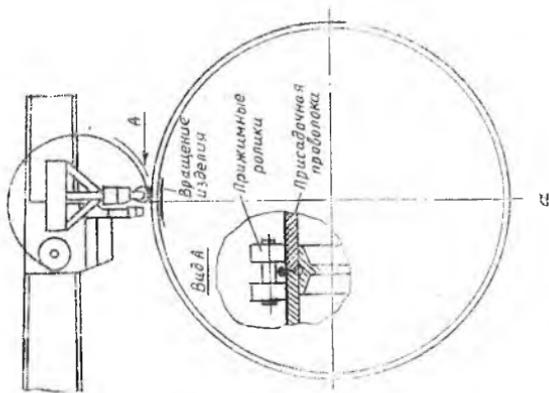


Рис. 3.7. Схема и внешний вид прижимного устройства (а) и перемещение кромок кольцевого шва при сварке прижимным приспособлением (диаметр оболочки 2000 мм, толщина 4 мм (б))

с пружающей проволокой в один проход позволяет практически вдвое сократить время сварки одного стыка.

На рис. 3.7,б приведены результаты записи перемещений кромок при сварке опытной обечайки при давлении на прижимном ролике 1800 Н. Роль прижима сводится к тому, чтобы не дать возможности кромкам оторваться от подкладного кольца перед сварочной горелкой. Небольшой подъем кромок настолько незначителен, что может не приниматься во внимание [14].

При выборе усилия прижатия кромок возникают трудности, связанные с определением его величины. Аналитическое выражение для необходимого усилия свидетельствует о том, что его величина  $P$  пропорциональна перемещению  $\omega$ , возникающему при сварке, и жесткости оболочки:

$$P = \frac{8 \cdot D \omega}{0,149 \varphi^2 \pi R^2} \quad (3.1)$$

где  $R$  — радиус оболочки,  $\varphi$  — секторный угол подъема кромок над поверхностью оболочки.

Параметры  $\varphi$  и  $\omega$  для некоторых частных случаев могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 3.6. На предприятиях отрасли при сварке тонкостенных обечаек используют принцип, при котором зона кольцевого шва охватывается с наружной стороны жестким бандажом, и сварка первого прохода, а в целом ряде и весь шов, выполняется изнутри обечайки. Такое решение представляется правильным, однако для его использования необходима более сложная специальная оснастка, а в отдельных случаях — коренное изменение технологии сварки.

В работах [19, 20] исследовано напряженное состояние кромок при сборке кольцевых стыков под сварку на разжимных подкладных кольцах с конусной рабочей поверхностью, а в случае сварки обечаек различной жесткости за счет уменьшения периметра менее жесткой обечайки. В оболочках из сталей, титана и других материалов, обладающих достаточно большим запасом температурных упругих деформаций, после сварки кольцевого шва наблюдается уменьшение диаметра в зоне наложения шва. Принципиальных отличий в характере деформаций кольцевых швов на сферических и тороидальных оболочках от цилиндрических нет.

Одной из основных причин возникновения дефектов шва в изделиях из алюминиевых сплавов является неприлегание кромок к формирующей подкладке в процессе сварки. Если при выполнении продольных швов плотное прилегание кромок осуществляется прижимами по всей длине стыка, то на кольцевых швах это достигается за счет растягивающих напряжений от натяга кромок при разжиге подкладного кольца. В работе [19] для

сборки кольцевых стыков с натягом предложена конструкция подкладного кольца, у которого с целью максимального приближения к кромке точки приложения отгибающего усилия форму рабочей поверхности вместо цилиндрической выполючили в виде двойного усеченного конуса (рис. 3.8) [19], причем конусность уменьшалась с увеличением жесткости кромки.

Применение колец новой конструкции позволило при высоком качестве сборки стыка создавать натяг, исключая перемещение кромок в процессе сварки. Кроме того, использована сплошная прихватка, выполненная без подачи присадочной проволоки на большой скорости с погонной энергией в 4—6 раз меньшей, чем необходимо для сварки стыка. Снижение погонной энергии за счет увеличения скорости позволило получить малые деформации кромок, которые из-за неполного расплавления остаются достаточно жесткими. Это обеспечивает сохранение устойчивого при сборке положения кромок относительно друг друга, т. е. после скоростной прихватки упругие деформации кромок сохраняются.

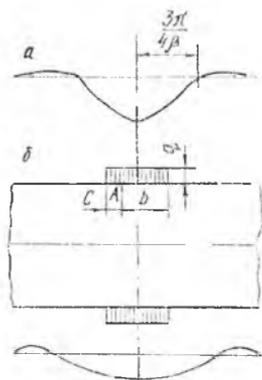


Рис. 3.8. Перемещение оболочки при сварке кольцевого шва без приспособления (а) и с разжимным кольцом (б)

Изучению вопросов влияния напряженного состояния кромки при сборке кольцевых стыков цилиндрических емкостей на качество соединений посвящены также работы [21—23] и др.

Требования к продольным и кольцевым сварным соединениям различны [24]. К продольным предъявляются требования плавности сопряжения основного металла с наплавленным, предотвращение смещения кромок и устранение зон с пониженной прочностью, к кольцевым — требования высокой пластичности. Поэтому одним из оптимальных технологических вариантов сварки цилиндрического сосуда является сварка с последующей прокаткой продольного шва и с разделкой кромок кольцевых швов (для увеличения доли участия присадочного металла в соединении).

Смещение кромок вызывает значительное повышение уровня напряжений в соединении, и в работе [25] хорошо отражается истинная картина напряженного состояния сварного соединения с указанным отклонением.

### 3.4. КРУГОВЫЕ ШВЫ В ПЛАСТИНАХ

Вварка в тонкий лист (пластину) элементов жесткости в виде круглых фланцев, патрубков, приводит к значительным перемещениям в конструкции. Наличие ребер, стенок и т. п. не всегда позволяет в нужной мере снизить величины отклонений и выдерживать проектные допуски. Например, пластина диаметром 480 мм, толщиной 2,2 мм с вваренным в нее по центру фланцем диаметром 80 мм (рис. 3.9) после сварки напоминает пропеллер.



Рис. 3.9. Характер перемещений пластины с фланцем после сварки

Качественно такой же характер потери устойчивости наблюдается и при других размерах пластин ввариваемых штуцеров (фланцев).

Возникающий прогиб оболочки носит, как правило, местный характер и в зависимости от ее размеров может достигать около стыка 7...15 мм и более. В большинстве случаев такие отклонения от проектной поверхности не укладываются в допуски и представляют трудности для технолога как в процессе изготовления изделия (стыковка под сварку с другими элементами), так и при сборке (натяги и перекосы в системах трубопроводов и т. п.). В некоторых типах конструкций наличие прогибов в зоне швов приводит к концентрации напряжений.

Особо следует отметить случай близкого расположения нескольких круговых сварных соединений, при котором происходит наложение полей деформаций и напряжений от отдельных швов, а перемещения в конструкции приобретают характер, не поддающийся заранее какому-либо расчету.

Главными факторами при рассмотрении полей остаточных деформаций и напряжений данного вида соединений являются следующие:

- жесткость пластины;
- жесткость ввариваемого кругового элемента (фланец, заплатка), зависящая от конструктивного оформления;
- режим сварки.

Несмотря на многообразие конструктивных форм, можно сформулировать условия общей задачи по определению остаточных напряжений и деформаций ( $\sigma_{ост}$ ,  $\epsilon_{ост}$ ) кругового сварного соединения в пластине.

Расчетные допущения следующие:

- гипотеза одновременности заварки шва по длине;
- учет степени реализации поперечной и продольной (окружной) усадки шва, возникающих при выполнении кругового сварного соединения.

При указанных допущениях задача по определению остаточных сварочных напряжений, возникающих в сечении, сводится к определению этих величин при сшивании и сварке кольцевой пластины А с кольцом Б, представляющим зону пластических деформаций шва, и фланцем В (рис. 3.10). Под фланцем В здесь

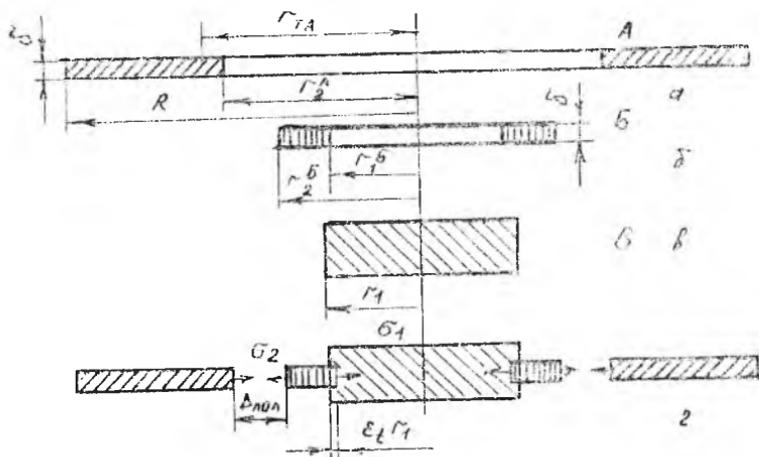


Рис. 3.10. Расчетная схема определения остаточных напряжений в круговом шве: а — пластина, б — шов, в — фланец, с — схема сшивания

следует понимать фланец любой конструкции или заплатку [26].

Поперечная усадка стыкового сварного соединения происходит всегда и независимо от типа соединения (продольный шов, круговой, кольцевой) при условии постоянства теплового воздействия и теплоотдачи

$$U_{\text{п}} = K(q/v_{\text{св}} S) (\alpha/c \rho), \quad (3.2)$$

где  $q = 0,5 IU$  — для сварки в защитных газах;  $K$  — коэффициент, зависящий от материала и равный 1,3 ... 1,4 — для алюминиевых сплавов и 1,6 ... 1,8 для сталей [9].

На рис. 3.11 приведены величины  $U_{\text{п}}$  в зависимости от удельной погонной энергии  $q/v_{\text{св}} S$  для малоуглеродистой стали и алюминия. Величина продольной (окружной) упругой деформации растяжения шва (в данном случае  $\epsilon_t$ ), вводимая в условие «сшивания», для сталей достигает величины  $\epsilon_t$  в прямолинейных стыковых соединениях, и 0,5 ... 0,7  $\epsilon_t$  для алюминиевых, титановых, магниевых сплавов. Тот факт, что остаточная упругая величина продольной составляющей достигает  $\epsilon_t$ , и положен в основу распространенных методов расчета.

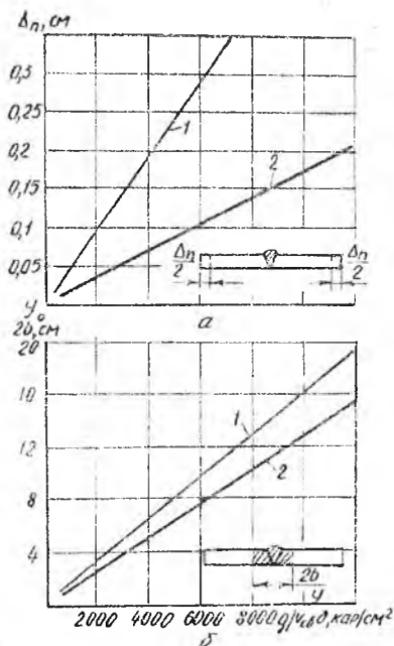


Рис. 3.11. Зависимость свободной поперечной усадки (а) и ширины зоны пластических деформаций (б) от удельной погонной энергии сварки для алюминиевых сплавов (1) и низкоуглеродистых сталей (2)

значений  $\sigma_T$  материала. В прямолнейных стыковых соединениях величина максимальных продольных напряжений составляет 0,5...0,7  $\sigma_T$ . На увеличение значений остаточных напряжений при круговом шве влияет жесткость сварного соединения при двусосном напряженном состоянии.

С точки зрения разработки расчетных методов для тех или иных технологических приемов снижения или устранения деформаций, перемещений и напряжений в пластине (также в оболочке) первостепенный интерес представляет поле остаточных радиальных напряжений.

Круговое сварное соединение — более жесткое по сравнению с прямолнейным стыковым швом при сварке свободных пластин, и поля пластических продольных (окружных) укорочений после остывания (а следовательно, и величина упругой тангенциальной деформации  $\epsilon_T$ ) носят несколько иной характер, чем в случае прямолнейного шва. Прямолнейный шов имеет возможность свободно сокращаться в поперечном направлении. Ввиду того, что деформация в поперечном (радиальном) направлении в круговом шве под действием продольной усадки затруднена, следует ожидать возрастания величины упругой тангенциальной составляющей растяжения до величины, близкой к  $\epsilon_T$ , и для таких материалов, как алюминий, титановые, магниевые сплавы. При малых диаметрах круговых швов и радиальные  $\sigma_z$  и тангенциальные  $\sigma_t$  напряжения в зоне соединений достигают

### 3.5. КРУГОВЫЕ ШВЫ В СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ

Отличие характера деформаций и перемещений, возникающих в сферической оболочке при сварке кругового шва, от деформаций и перемещений пластины с таким же швом состоит в том, что усадка шва в продольном (тангенциальном) и поперечном (радиальном) направлениях приводит к перемещению поверхности оболочки (прогибу) на выпуклых поверхностях.

Прогиб оболочки в зоне соединения — основная особенность деформирования поверхности при сварке кругового шва.

В первом приближении задача о перемещениях поверхности оболочки, возникающих при сварке кругового шва, может быть представлена в виде трех отдельных этапов: I — перемещения от поперечного укорочения шва; II — перемещения от продольного укорочения шва; III — общее перемещение от совместных действий поперечного и продольного укорочений.

Для сварки кругового шва в пластине существенное значение на определение этих параметров имеет технология сборки (на-

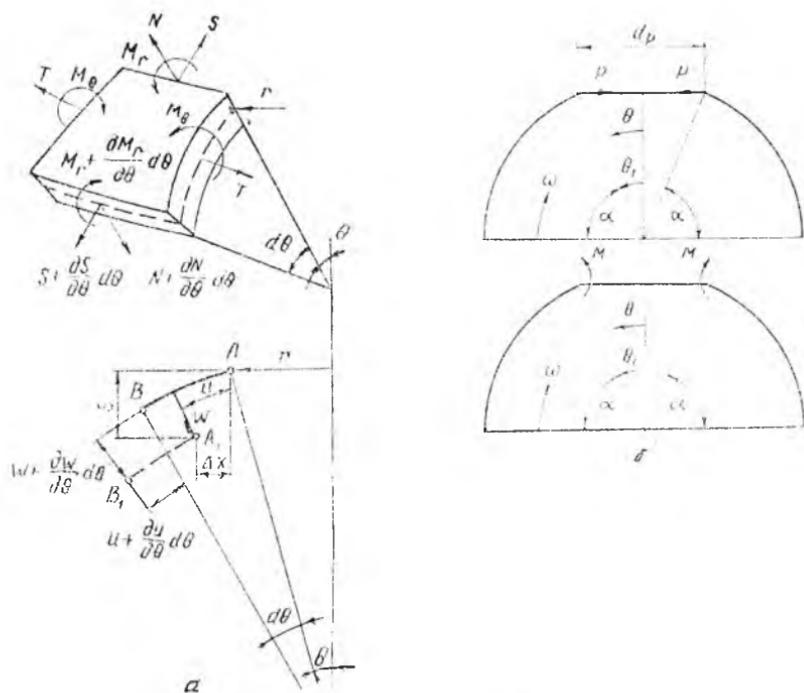


Рис. 3.12. Усилия и перемещения в оболочках при ассиметричной деформации (а) и крайние нагрузки в оболочках (б)

личис прижимов и т. д.) под сварку. Технология сборки фланца со сферической оболочкой предусматривает в большинстве случаев прижим последней по линии, коаксиальной стыку, на некотором расстоянии от него.

При осесимметричной деформации смещение какой-либо точки поверхности оболочки можно разложить на два направления:

- по нормали к поверхности оболочки,
- по касательной к меридиану (рис. 3.12,а).

Отметим, что перемещение  $U$  совпадает с направлением поперечной усадки шва. Составляющая перемещения  $w$  считается положительной, если направлена внутрь оболочки, а составляющая перемещения  $U$  положительна, если ее направление совпадает с положительным направлением касательной к меридиану. На рис. 3.12,б приведена схема напряжений края оболочки моментом  $M$  и красной силой  $P$ , где  $N$  — поперечные усилия,  $S$  — меридиональное усилие,  $T$  — тангенциальное усилие,  $M_r$  — изгибающий радиальный момент,  $M_\theta$  — тангенциальный момент.

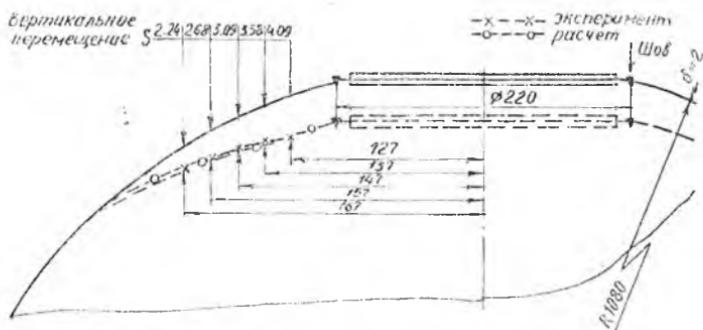


Рис. 3.13. Прогиб оболочки при сварке фланца из АМгб

На рис. 3.13 рассматривается пример изменения величины прогибов оболочки с  $R=1080$  мм,  $S=2,5$  мм с фланцем диаметром 220 мм. Режим сварки  $I=155$  А,  $U=12$  В,  $v_{св}=12$  М/ч, чему соответствует поперечная усадка  $U_n=1$  мм и  $y_0=30$  мм.

На рис. 3.14 представлена зависимость вертикального перемещения поверхности оболочки от диаметра шва (а, б), радиуса (а) и толщины оболочки (б) из сплава АМгб для режима сварки  $U_n=1$  мм,  $y_0=30$  мм. Каждая кривая состоит из двух ветвей: левая построена с учетом ограничения остаточных радиальных напряжений величиной  $\sigma_r$ , а правая — на основе уп-

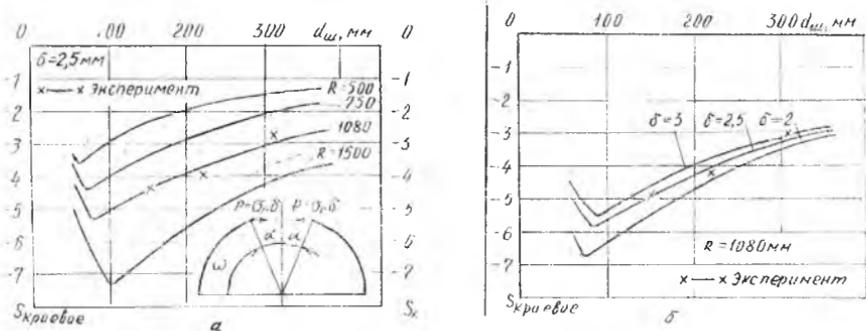


Рис. 3.14. Зависимость вертикального перемещения поверхности оболочки из сплава АМгб от ее геометрических параметров

ругого решения. Наиболее широкий, с точки зрения практики, диапазон диаметров круговых швов лежит именно в области упругого решения.

### 3.6. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЙ В КРУГОВЫХ ШВАХ

*Предварительная и послесварочная деформация.* В радиальном направлении вблизи стыка действуют растягивающие напряжения, направленные к центру свариваемого кругового элемента. Возникающие при этом тангенциальные напряжения сжатия приводят к потере устойчивости пластины и перемещениям из плоскости. Возникновение радиальных напряжений растяжения в зоне шва на сферических оболочках сопровождается прогибом (провалом) поверхности. Исходя из этих положений можно построить методы по устранению остаточных перемещений, основанные на идее снижения радиальных напряжений.

Применительно к пластинам снижение напряжений необходимо для обеспечения их устойчивости. Это снижение можно осуществить с помощью радиального перемещения. В пластинах зона кругового отверстия подвергается выштамповке на некоторую величину (рис. 3.15,а) [24]. Затем накладывается круговой шов, в результате чего происходит частичное уменьшение высоты (рис. 3.15,б) первоначальной выштамповки. После этого зона выштамповки осаживается в плоскость пластины (рис. 3.15,в). Сочетание двух операций — предварительной пластической деформации и послесварочной осадки — для пластины является обязательным, так как величина напряжений, вызывающая потерю устойчивости кромок, весьма незначительна, и снижение ее необходимо для устранения возможности потери устойчивос-

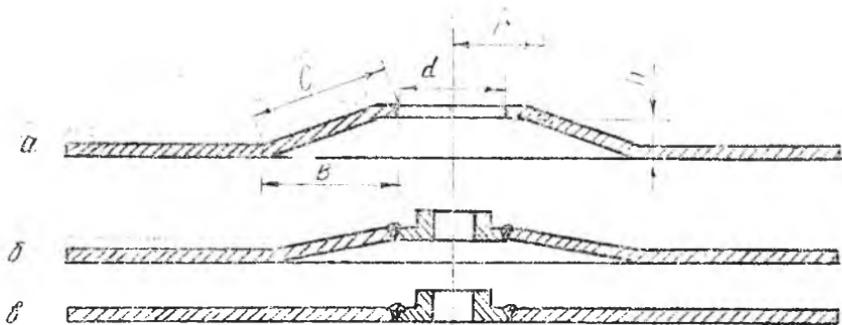


Рис. 3.15. Предварительная выштамповка и последующая осадка в пластинках

ти. Иными словами, снижение остаточных напряжений в пластине неотделимо от устранения остаточных перемещений, вызванных потерей устойчивости.

Применительно к сферическим оболочкам можно ограничиться только первой операцией, а именно — выштамповкой зоны кругового отверстия на величину ожидаемого прогиба в направлении, обратном ему (рис. 3.16) [12]. В оболочках наличие оста-

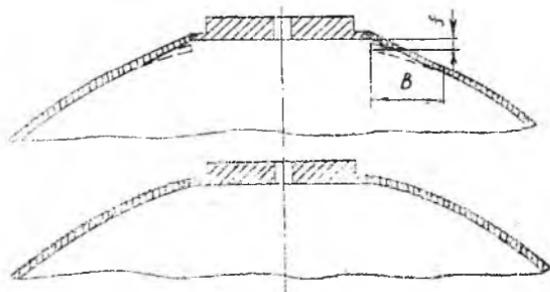


Рис. 3.16. Зона кругового отверстия на оболочке после выштамповки и после сварки

точных напряжений допустимо, так как сварочные деформации могут быть устранены без изменения поля напряжений. Лишь в специальных случаях послесварочная осадка может быть рекомендована и для оболочек (в случаях весьма пологих оболочек). В качестве основных параметров следует считать ширину  $B$  и профиль зоны (рис. 3.17) [12].

Учитывая сложность точного технологического выполнения выштамповки по какой-либо профильной кривой для получения проектной поверхности оболочки после сварки, с целью упрощения в качестве основного расчетного параметра принимают

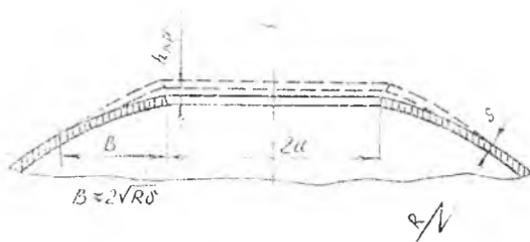


Рис. 3.17. Схема расчета выштамповки в оболочке

величину  $h_{кр}$  — вертикальную крайнюю составляющую перемещения на радиусе  $R$ .

Ширину зоны выштамповки  $B$  можно принимать из следующих соображений. Согласно теории упругих оболочек, влиянием одного края на другой можно пренебречь, если расстояние между краями не меньше  $l = 2\sqrt{RS}$ , где  $R$  и  $S$  — радиус и толщина оболочки. Это соотношение отражает ту особенность, что крайняя нагрузка создает локальное, быстро затухающее на некотором расстоянии поле напряжений, деформаций и перемещений. Исходя из сказанного величину  $B$  следует выбирать в пределах

$$3/4 l \leq B \leq l. \quad (3.3)$$

Соотношение (3.3) относится к тем круговым сварным соединениям, которые удалены от других швов и края оболочки на расстояние не менее  $3/4 l$ . За  $h_{кр}$  удобнее всего принять величину прогиба оболочки в зоне шва.

При сварке фланцев в пологие сферические оболочки искажается форма изделия — проседает фланец и примыкающая к нему область в направлении к центру сферы [27]. Для предотвращения такого изменения формы наряду с обычно применяемыми мерами [28, 29] может быть использован предварительный упругий выгиб. Влияние предварительного упругого выгиба на остаточное напряжение деформированного состояния оболочки от сварки кругового соединения проявляется следующим образом [27]. Кроме пластических деформаций укорочения остаточные сварочные напряжения вызваны усадкой металла шва и зоной термического влияния, которая происходит в радиальном и окружном направлениях. Усадка в первом случае фактически является поперечной ( $\Delta_n$ ), во втором — продольной ( $\Delta_{пр}$ ). Поперечная усадка стремится сблизить зоны термического влияния оболочки и фланца, вызывая их растяжение в меридиональном направлении. Принято считать, что для компенсации  $\Delta_n$  необходимо создавать меридиональные перемещения оболочки и фланца к шву на величину  $v_{,n} \approx 0,5 \Delta_n$ . Но это относится только

к случаю одновременной сварки шва. При штатных режимах сварки оболочек из алюминиевых сплавов и особенно при больших диаметрах кругового соединения данное условие невыполнимо, так как в процессе сварки первой четверти шва поперечная усадка развивается практически свободно, а с переходом дуги на вторую половину шва ее свободное нарастание прекращается. Дальнейшее изменение  $\Delta_n$  связано с растяжением свариваемых оболочки и фланца в меридиональном направлении. Величину свободных меридиональных перемещений оболочки и фланца, направленных к шву и компенсирующих его поперечную усадку, следует принимать равной  $v_{rn} \approx n_n \Delta_n$ , где  $n_n$  — коэффициент, зависящий от технологии сварки и диаметра кругового шва. Его величина изменяется от 0,25 (сварка швов большого диаметра с малыми скоростями; выполнение кругового соединения участками — вторая половина шва начинает свариваться лишь после полного остывания первой) до 0,5 (сварка швов малых диаметров с большой скоростью; выполнение кругового соединения с предварительной постановкой прихваток по стыку). Значение  $\Delta_n$ , зависящее от погонной энергии сварки и теплофизических характеристик свариваемого материала, определяется экспериментально и расчетным способом.

Воздействие окружной усадки шва  $\Delta_{пр}$  на оболочку аналогично воздействию  $\Delta_n$ . В то же время она стремится сжать свариваемый элемент как в окружном, так и радиальном направлении. Величина окружной усадки в конструкциях из алюминиевых сплавов принимается равной [27]  $\Delta_{пр} \approx \epsilon_{02} 2\pi r_{ш}$ , где  $r_{ш}$  — радиус кругового сварного соединения.

В случае свободного окружного сокращения шва возникают направленные к центру радиальные перемещения  $v_{rпр} = (\Delta_{пр}/2\pi)$ . Такую величину радиальных перемещений к центру кругового соединения следует создать для компенсации продольной усадки шва. На практике  $v_{rn} \gg v_{rпр}$ , и для предотвращения остаточного напряженного состояния оболочки от усадки шва необходимо компенсировать  $\Delta_n$ .

Предварительный упругий выгиб оболочки создает в з.т.в. «запас» меридионального  $v_r$  и окружного  $v_a$  перемещений, противоположных по знаку  $\Delta_n$  и  $\Delta_{пр}$ .

В работах [30, 31] приведены данные о влиянии предварительного упругого выгиба кромки отверстия в сферической оболочке на остаточные деформации при приварке жесткого фланца. Экспериментально получено распределение радиальных и тангенциальных напряжений по меридиану оболочки после сварки с учетом и без учета предварительного упругого выгиба. Интенсивность усилий упругого выгиба определялась из условия достижения тангенциальными напряжениями значения, равного  $0,8 \sigma_T$  (где  $\sigma_T$  — нормативный предел текучести материала).

При этом оболочка считалась настолько пологой, что при определении интенсивности усилия  $P_n$  использовалась теория изгиба пластин.

В работе [32] излагается методика определения интенсивности усилия  $P_n$  в соответствии с теорией сферических оболочек и сопоставляются результаты теоретического решения с экспериментальными данными. Также рассматривается осесимметричное напряженное состояние пологой сферической оболочки толщиной  $S$  с радиусом средней поверхности  $R$  и центральным круговым вырезом, имеющим радиус  $\delta_0$ . Оболочка

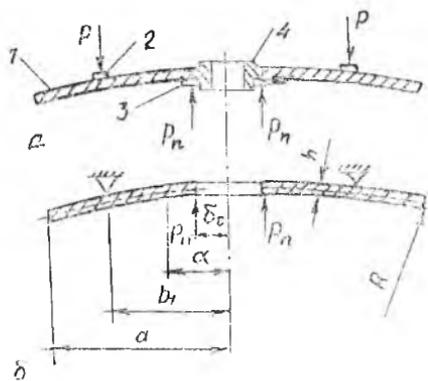


Рис. 3.18. Схема упругого изгиба:  $a$  — принципиальная;  $b$  — расчетная; 1 — оболочка; 2 — опорное кольцо; 3 — прижимное кольцо; 4 — фланец

оперта на кольцевую шарнирную опору радиусом  $b_1$  (рис. 3.18).

Экспериментальные значения напряжений определялись методом тензометрирования на расстоянии 10 мм от кромки отверстия на верхних и нижних волокнах поперечного сечения (рис. 3.19). На рис. 3.20 сопоставляются теоретические и экспери-

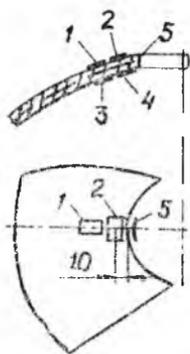


Рис. 3.19. Схема расположения тензодатчиков 1...5

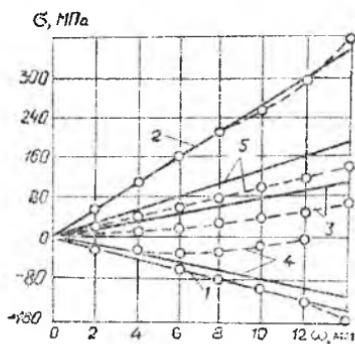


Рис. 3.20. Сопоставление теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (штриховые линии) значений напряжений: 1, 3 — радиальные напряжения  $\sigma_r$  в верхних и нижних волокнах соответственно, 2, 4 — то же, окружные напряжения  $\sigma_\theta$ , 5 — окружные напряжения в кромке выреза

ментальные данные для рассматриваемой оболочки в зависимости от перемещения  $w$ .

В работе [33] приведены эксперименты по исследованию остаточных перемещений поверхности, временных и остаточных смещений кромок стыка при сварке кругового соединения в тонкостенной сферической оболочке с применением предварительного упругого выгиба и разработана методика определения его оптимальной величины.

Эксперименты выполнялись на полусферах толщиной 2,5 мм с радиусом кривизны 150 мм, в которые вваривались жесткие фланцы диаметром 60 мм. Материал деталей свариваемого узла — сплав АМг6Н. Сварка соединений — механизированная на переменном токе неплавящимся электродом в аргоне с подачей присадочной проволоки на режиме  $I_{св} = 130 \dots 140$  А,  $u = 16$  В,  $v_{св} = 3,15$  мм/с. Сборку кругового соединения производили без постановки прихваток в силовой оснастке.

При проведении исследований ставилась задача обеспечить отклонения поверхности сварной оболочки от исходного контура менее 0,3 мм.

Предварительный упругий выгиб в сторону увеличения радиуса кривизны оболочки является обратным по отношению к остаточным сварочным перемещениям.

В работах [34, 35] приведено решение задачи об упругом выгибе сферической оболочки в зоне отверстия, когда силы выгиба приложены на требуемом расстоянии от кромки отверстия. Результаты теоретического решения сопоставляются с экспериментальными данными, исследуется влияние параметров выгиба на напряженно-деформированное состояние сферической оболочки.

При решении поставленной задачи оболочка разрезается на части А, Б и В' по линии действия сил выгиба и сил реакции опорного контура (рис. 3.21,а). При этом выполняется условие их последующего «сшивания», для чего по кромкам разрезанных частей прикладываются соответствующие силы и моменты. Величина зоны выгиба  $b_b$ , как показано в работе [33], не должна превышать ширину  $b_3$  зоны затухания красной нагрузки, определяемой по формуле [36]

$$b_3 = 2 \sqrt{RS}, \quad (3.4)$$

где  $R$  и  $S$  — соответственно радиус и толщина оболочки.

Анализ геометрических размеров используемых на практике оболочек с круговыми швами показывает, что при  $b_b \leq b_3$  область оболочки, лежащая внутри опорного контура (сферические кольца А и Б), может быть отнесена к классу пологих, а оставшаяся часть В' в общем случае является неполойгой. Следовательно, решение данной задачи требует применения методов

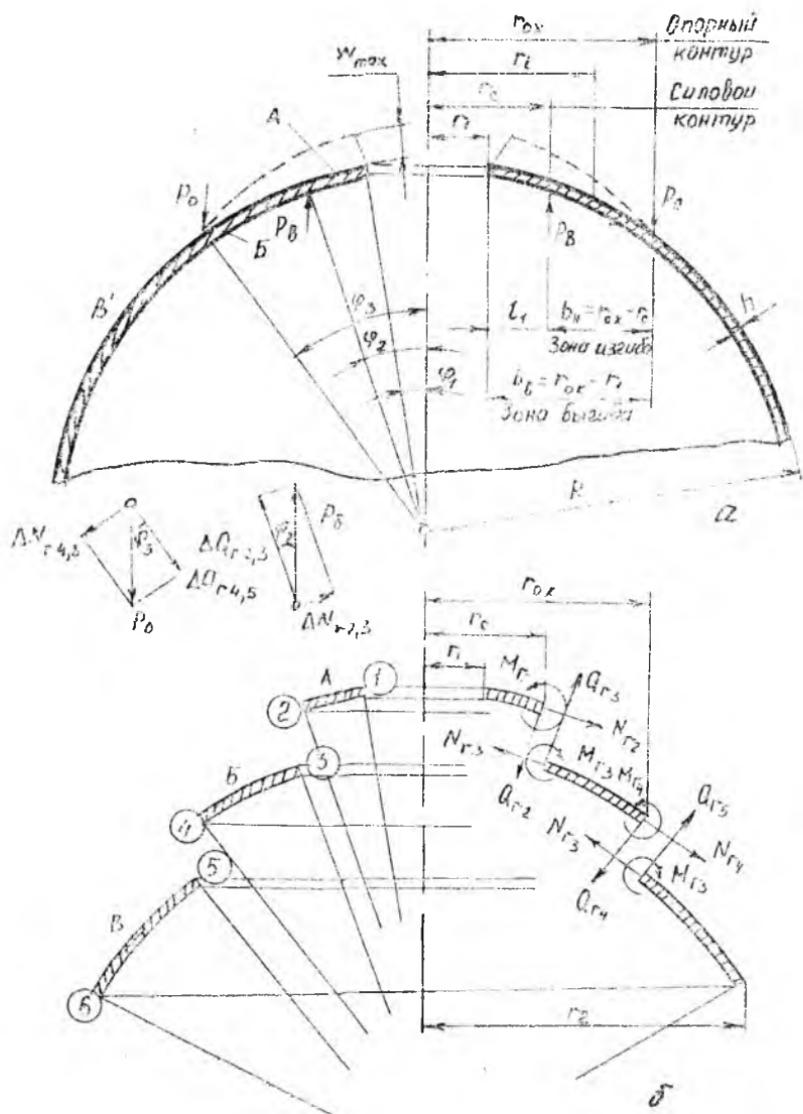


Рис. 3.21. Действительная (а) и расчетная (б) схемы выгиба сферической оболочки в зоне отверстия

расчета пологой и непологой оболочек. Однако этого можно избежать, если в оставшейся части В' выделит кольцо В (рис. 3.21, б), у которого диаметр большего основания удовлетворяет условию пологости оболочки, а ширина не менее  $b_3$ . Поскольку на основание этого кольца не воздействуют какие-либо внешние силовые факторы, из всех кромок «сшиваемых» колец А, Б и В наименьшее влияние на напряженно-деформированное состояние оболочек будет оказывать нижняя кромка кольца В. Поэтому условно принятая замена оболочки В' кольцом В не должна приводить к значительным погрешностям расчета.

Работы проведены на оболочках из алюминиевого сплава АМгб, геометрические размеры которых существенно различались. Исследовались варианты приложения сил выгиба непосредственно по кромке отверстия и при удалении от нес. Диаметр опорного контура задавался так, чтобы ширина зоны выгиба не превышала ширину зоны затухания красной нагрузки [ $(b_n/b_3) \leq 1$ ]. Данное условие важно, так как именно в этом случае характер распределения напряжений и деформаций в оболочке наиболее сложен в связи с существенным взаимным влиянием кромки отверстия, мест приложения сил выгиба и сил реакции опорного контура.

В связи с тем, что основной задачей применения предварительного упругого выгиба является создание перемещений оболочки, обратных сварочным, следует использовать условие  $l_1 \leq 0,3 b_3$ . Из этих же соображений, как показано в работе [33], ширину зоны выгиба целесообразно задавать равной ширине зоны остаточных перемещений оболочки от кругового шва

$$b_w = 2 (1 - R \cdot 10^{-4}) (R - r_1) \sqrt{S/R}. \quad (3.5)$$

Тогда величину  $l_1$  также удобнее выбирать в зависимости от значения  $b_w$ , т. е.  $l_1 \leq 0,3 b_w$ . Место приложения сил выгиба при сварке алюминиевых сплавов должно быть за пределами распространения сварочных изотерм 625 ... 675 К.

Результаты работы [34] позволили создать уточненную методику определения параметров упругого выгиба для сварки круговых соединений в оболочках. Прежде всего по заданному режиму сварки расчетным или экспериментальным путем находят: а) величину наибольшего остаточного прогиба оболочки; б) ширину  $b_{пл}$  зоны пластических сварочных деформаций укорочения; в) минимальное удаление места приложения сил выгиба от кромки отверстия [33]. Затем по геометрическим размерам оболочки определяют ширину зоны выгиба или места приложения сил реакции опоры [33] и при действии единичной силы выгиба рассчитывают ширину зоны окружного растяжения. Если  $b_p < b_{пл}$ ,

то задается большее удаление сил выгиба от свариваемой кромки, но не больше  $0,3 b_{\text{шв}}$ . После этого находят перемещение кромки отверстия по нормали к поверхности и действующие в ней окружные напряжения. Наконец, исходя из условия равенства перемещений оболочки от сварки кругового шва и от предварительного упругого выгиба, определяют силу выгиба  $P_{\text{в}}$ .

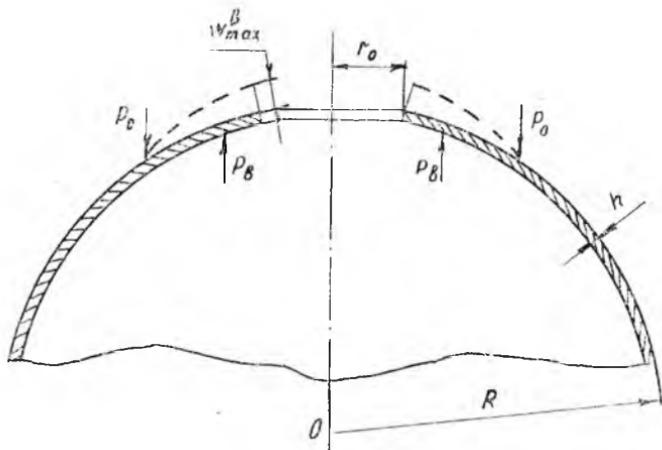


Рис. 3.22. Схема выгиба сферической оболочки в зоне отверстия

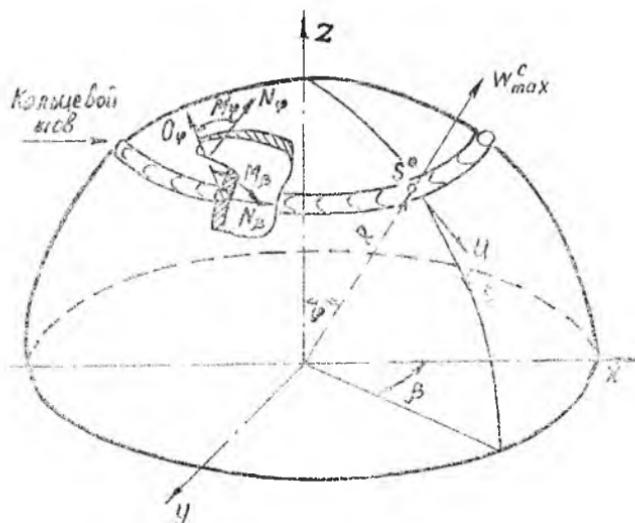


Рис. 3.23. Сферическая оболочка с круговым сварным швом

Работа [37] посвящена изучению с помощью математического моделирования на ЭВМ особенности распределения перемещений точек поверхности сферической оболочки как при упругом выгибе, так и при наложении кольцевых швов, а также исследованию кинетики напряжений в процессе остывания сварного шва.

Основываясь на данных работы [35] о том, что связь между размерами нормального к поверхности оболочки перемещения кромки отверстия  $w^b_{\max}$  (рис. 3.22) и остаточного прогиба  $w^c_{\max}$  (рис. 3.23) можно представить в виде

$$w^b_{\max} = -w^c_{\max}, \quad (3.6)$$

нормальные перемещения при упругом выгибе подсчитывали по методике, предложенной в работе [34]. На основании полученных результатов построены зависимости значения прогиба кромки отверстия  $w^b_{\max}$  от безразмерного параметра  $r_0/\sqrt{RS}$  (рис. 3.24), где  $r_0$  — радиус отверстия,  $R$  — радиус оболочки,  $S$  — толщина оболочки. При этом брались наиболее распространенные типоразмеры оболочек. Для выявления общих закономерностей величина  $w^b_{\max}$  представлена в зависимости от безразмерного параметра  $r_0/\sqrt{RS}$  для случая, когда сила выгиба  $P_n = 10 \text{ Н/мм}$ . Анализируя приведенные на рис. 3.24 данные, видим, что  $(S/R) \geq 0,0018$

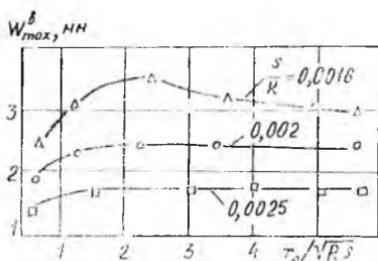


Рис. 3.24. Графики перемещения  $w^b_{\max}$  в сферической оболочке при упругом выгибе

с ростом отношения толщины оболочки к ее радиусу прогиб существенно изменяется, если  $(r_0/\sqrt{RS}) < 2$ . В то же время следует отметить, что в случае  $(S/R) \leq 0,0016$  прогиб зависит от  $r_0/\sqrt{RS}$  практически на всем интервале. Наиболее сильно вышеуказанная закономерность проявляется при  $0,5 \leq (r_0/\sqrt{RS}) \leq 3,5$ . Таким образом, можно отметить тенденцию к уменьшению зоны существенной зависимости  $w^b_{\max}$  от параметра  $r_0/\sqrt{RS}$  с ростом  $S/R$ .

Представленные результаты позволяют исходя из знания величины требуемых нормальных перемещений кромки отверстия подобрать значение силы  $P_n$ , что является определяющей характеристикой при проектировании силовой оснастки.

Чтобы реализовать условие (3.6), необходимо знать величину  $w^c_{\max}$ . С этой целью можно воспользоваться алгоритмом

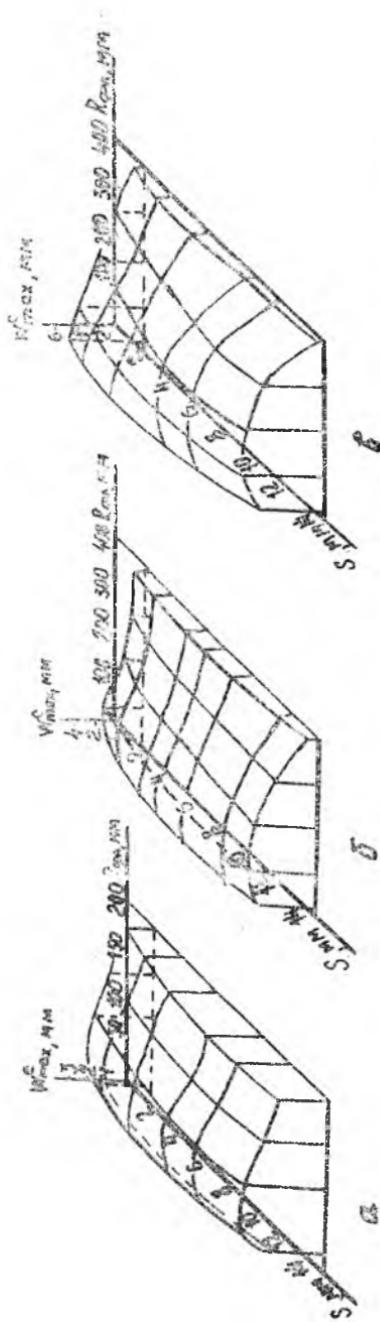


Рис. 3.25. Остаточные перемещения  $w_{\max}^c$  в сферических оболочках, вызванные сварочным нагревом:  
 $a - R = 900$  мм,  $б - R = 1500$  мм,  $в - R = 2700$  мм

расчета напряженно-деформированного состояния толстых оболочек вращения при наложении круговых швов, который приведен в работе [38].

На основе выполненных расчетов построены пространственные диаграммы, позволяющие определять остаточные прогибы от сварки круговых швов в сферических оболочках (рис. 3.25). При этом брались точки, расположенные на оси сварного шва. Все три пространственные диаграммы в координатах  $S$ ,  $R_{\text{фл}}$  и  $w_{\max}^c$  имеют подобный рельеф поверхности.

*Осадка компенсационного кольца фланца.* Метод выштамповки зоны кругового шва легко осуществляется для соединений, удаленных достаточно друг от друга или от края изделия, когда ширина зоны выштамповки может быть выбрана в пределах, определенных расчетом.

Однако в случае близко-го расположения нескольких круговых соединений или близости края применение указанного метода невозможно.

При рассмотрении кругового шва около края оболочки, а тем более у края пластины можно заметить потерю устойчивости. На рис. 3.26,а показана обычная конструкция кругового сварного соединения, когда

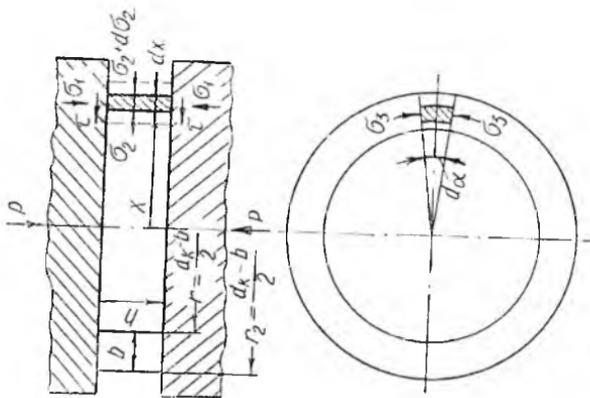


Рис. 3.27. Расчетная схема определения осадки

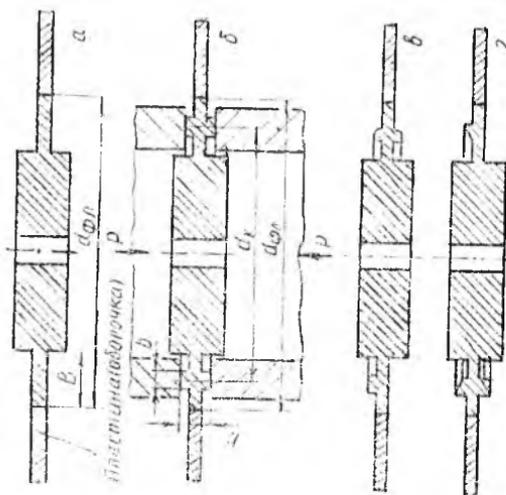


Рис. 3.26. Круговое соединение с компенсационными кольцами

фланец (штуцер), свариваемый с пластиной (оболочкой), имеет постоянную толщину вблизи стыка на некоторой ширине  $B$ . На рис. 3.26,б изображена новая конструкция фланца с компенсационным кольцом, расположенным эквивалентно стыку. После сварки кругового шва кольцо осаживают под прессом обычным плоским инструментом, обеспечивая деформацию зоны шва в радиальном направлении и компенсируя упругую радиальную составляющую остаточного поля напряжений. В зоне шва в радиальном направлении действуют растягивающие напряжения. Осадка же компенсационного кольца создает вблизи стыка сжимающее поле напряжений, т. е. компенсирует существующее.

Таким образом, если метод выштамповки предусматривает компенсацию за счет предварительной пластической деформации зоны оболочки, то в данной технологии тот же эффект достигается благодаря последовательной пластической деформации фланца, причем сравнительно простым способом.

Разные варианты выполнения кольца, показанные на рис. 3.26, могут быть применены для разного типа конструкций. При малых толщинах пластины или оболочки (до 4...5 мм) кольцо можно выполнять односторонним, так как градиент радиальной составляющей деформации по толщине незначителен. Однако увеличение толщины материала вызывает необходимость применения двустороннего компенсационного кольца.

Последовательную осадку кольца можно осуществлять либо заподлицо с поверхностью буртика фланца, либо оставляя некоторое усилие с последующим удалением металла. Усилие, необходимое для осадки компенсационного кольца (рис. 3.27) [12]:

$$P = \sigma_T \pi \left[ d_k b + \frac{b^2 \gamma}{S} \left( d_k - \frac{b}{3} + \frac{2}{3} \frac{b^2 \gamma}{S} (d_k - b) \right) \right], \quad (3.7)$$

где  $\gamma$  — коэффициент трения,  $d_k$  — средний диаметр кольца. Величину  $b$  следует выбирать в пределах 3...5 мм. Величина  $h = [S + (1...2)]$ , где  $S$  — толщина стыка в месте фланца.

В качестве оптимального варианта с точки зрения минимальной величины усилия осадки, как показал эксперимент [12], пригодно сечение в виде полуокружности (рис. 3.26,в, правая часть). Начальное усилие в момент контактирования инструмента с весьма малой площадью кольца меньше расчетного и постепенно возрастает с увеличением пятна контакта. Пластические деформации в кольце в начальный период осадки протекают при меньших усилиях. Компенсационное кольцо должно плавно сопрягаться с буртиком фланца, что необходимо также для прочности и имеет целью устранение концентратора напряжений.

Анализ напряженного состояния в пластине и оболочке показал, что пик остаточных радиальных напряжений смещен от швов в сторону большого диаметра примерно на ширину зоны пластических деформаций, имевших место при нагреве. Устранение упругой составляющей в пластине или оболочке в этом месте с помощью, например, компенсационного кольца является идеальным случаем. Конструктивно кольцо располагают ближе к центру и диаметр его  $d_k$  меньше диаметра шва. Следовательно, кольцо следует располагать как можно ближе к границе стыка. Ограничение вносится шириной усиления шва, а поэтому практически  $1/2 (d_{фл} - d_k) = 8...12$  мм.

#### *4. ПОСЛЕСВАРОЧНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ*

##### *4.1. ОБКАТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

Для большинства реальных прецизионных сварных конструкций, в особенности с большим количеством разнообразных сварных соединений, прогнозирование и предупреждение деформирования во времени, как правило, не позволяют обеспечить на требуемом уровне размерную стабильность. В этом случае доминирующее значение для всех без исключения ответственных высокопрочных конструкций имеют методы обработки уже готовых сварных конструкций с целью обеспечения их долговременной размерной стабильности зачастую в жестких условиях эксплуатации.

Приведем краткое описание и характеристики с точки зрения применимости специальных стабилизирующих послесварочных методов обработки сварных конструкций и их соединений.

Пластические деформации укорочения, возникающие при сварке в зоне шва и прилегающей области, приводят, как известно, к местному остаточному укорочению в продольном направлении. Для снятия напряжений в сварном шве каждое продольное волокно зоны пластических сварочных деформаций необходимо удлинить настолько, насколько оно укоротилось при сварке. А так как все укорочения волокон поперечного сечения шва имеют различную величину, для полного устранения напряжений им должна быть сообщена и различная величина деформаций пластического удлинения. Вполне естественно, что осуществить такую неравномерную по поперечному сечению сварного соединения деформацию невозможно ни одним из существующих методов, за исключением высокотемпературного отпуска конструкции. Необходимая точность на стадии изготовления, по не эксплуатации, при этом обеспечивается рациональным пере-

распределением остаточных напряжений, как показано на рис.4.1 [12, 13]. Такое перераспределение достигается осадкой при обкатке некоторой части зоны пластического сварного укорочения по толщине. В результате осадки происходит равномерное удлинение металла и частичная или полная компенсация сварочных

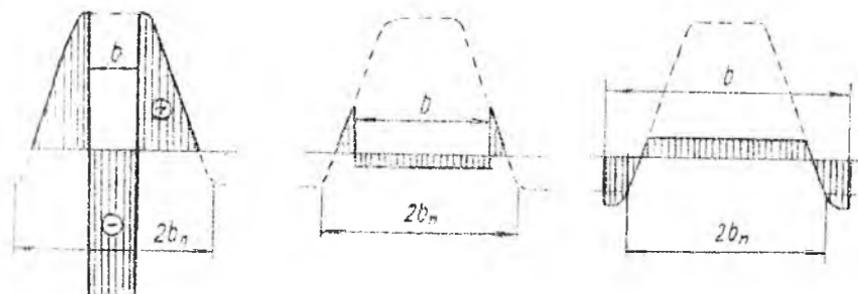


Рис. 4.1. Эпюры напряжений при различных соотношениях между шириной прокатываемых зон  $b$  и шириной зоны пластических деформаций  $2b_n$

деформаций укорочения. В зависимости от соотношения ширины наливок и зоны остаточных пластических деформаций возможны несколько вариантов изменения эпюр остаточных напряжений в сварных швах. Из рис. 4.1 видно, что при изменении ширины обкатываемой зоны для устранения сварочных деформаций требуется большее или меньшее снижение остаточных напряжений. Причем, если обкатке подвергается более широкая зона в сравнении с зоной пластического укорочения, устранение напряжений может быть и неполным. Для этого требуется меньшее усилие, чем при устранении деформаций обкаткой только по шву, но процесс осуществляется на три—четыре прохода обкаткой по шву и прилегающей области [9, 14, 39, 40].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод обкатки может быть взят за основу при разработке специальных методов размерной стабилизации прецизионных сварных конструкций, поскольку при рациональном выборе зоны обкатки и режимов обработки можно довести уровень остаточных напряжений до необходимого минимума и, что самое главное, перевести растягивающие напряжения в сжимающие и наоборот. Другим достоинством этого метода является комплексное воздействие на сварное соединение при достаточно высоких степенях деформирования по толщине сварного шва. В этом случае наряду со снижением остаточных напряжений достигается, по-видимому, и улучшение характеристик размерной стабильности литой структуры сварного шва за счет существенного ее уплотнения и приближения к прокатной структуре, имеющей, как указывалось ранее, более высокий предел релаксации [41].

## 4.2. ОБРАБОТКА ПРЯМОЛИНЕИНЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

Подбор оптимального режима обкатки для устранения сварочных деформаций заключается в отыскании условий обкатки, которые обеспечивали бы наиболее полное устранение пластических деформаций укорочения и снятие продольных остаточных напряжений. Назначая режим обкатки, необходимо учитывать факторы, которые существенно влияют на величину пластической деформации: усилие на ролики, диаметры и ширина рабочего пояса роликов; толщина металла в зоне обкатки; предел текучести и модуль упругости материала; напряжения в металле перед обкаткой; жесткость обкатываемого изделия или узла.

Для устранения деформаций необходимо полностью снять напряжения или уравновесить эпюру напряжений в пределах зоны пластических сварочных деформаций. Для полного снятия напряжений обкатке подвергается вся зона пластических деформаций.

Усилие обкатки (в ньютонах) определяется приближенной формулой, описывающей процесс обкатки узкими роликами [12]:

$$P = C(\sigma_k - \sigma_n) \sqrt{\frac{6,7 dS (\sigma_n - 1,5 \sigma_k + 0,5 \sigma_T)}{E (0,7 \sigma_T + 0,3 \sigma_n)}} \quad (4.1)$$

где  $C$  — ширина рабочего пояса роликов, см;  $d$  — диаметр роликов, см;  $S$  — толщина металла в месте прокатки, см;  $\sigma_n$ ,  $\sigma_k$  — начальное и конечное напряжения в металле соответственно до и после прокатки, МПа.

Величина  $\sigma_n$  для большинства материалов равна  $0,6 \dots 1,2 \sigma_T$ . Если величина остаточных напряжений в зоне шва неизвестна, для расчета усилия обкатки она принимается равной  $\sigma_T$ , а значение  $\sigma_k$  считается равным нулю. Тогда форма определения усилия обкатки упрощается:

$$P = C \sqrt{\frac{10,1 dS \sigma_T^3}{E}} \quad (4.2)$$

Как показывают результаты экспериментов [12], проведенных по исправлению деформаций обкаткой на алюминиевых, магниевых и титановых сплавах, величину  $\sigma_k$  можно принять в работе равной  $(0,4 \dots 0,5) \sigma_T$ , если обкатывается только шов. Усилие обкатки по усилению шва может быть определено из формулы

$$P = 2,0 \sqrt{\frac{dS \sigma_T^3}{E}} \quad (4.3)$$

Если обкатка осуществляется на подкладке, то вне зависимости от материала, толщины обкатываемых листов, формы ус-

ления шва полное устранение деформаций достигается при усилии в 2,7—3 раза большем, чем при обкатке между двумя роликами.

На рис. 4.2 [12] показаны экспериментальные зависимости величины усилий обкатки швов двумя роликами, при которых остаточные напряжения снижаются до нуля, от толщины материала. В случае недостаточно плавного очертания усиления или проплавления шва и наличия резкого перехода от основного металла к наплавленному в этом месте возможна резкая концентрация деформаций. Поэтому даже для сплава АМг6 деформации желательно исправлять только путем прокатки основного металла, не затрагивая усиление шва, а для термоупрочняемых сплавов типа 1201 и других — тем более.

Существенной разницы между обкаткой плоских листов с прямолинейными швами и обкаткой продольных швов цилиндрических и конических оболочек нет. Поэтому необходимую корректировку режимов обкатки проводят на плоских образцах с прямолинейными швами. Несмотря на то, что стрела прогиба



Рис. 4.2. Зависимость усилия обкатки от толщины материала  $d = 12 \text{ см}$ ,  $C = 1,6 \text{ см}$

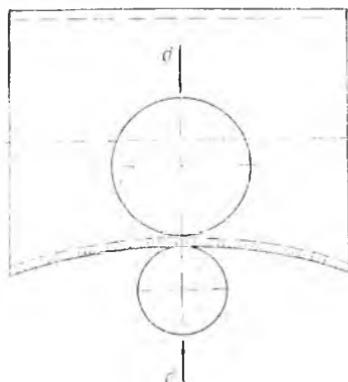


Рис. 4.3. Схема обкатки продольного шва оболочки роликами разных диаметров

листа после сварки значительно больше, чем изгиб образующей оболочки в зоне шва, деформация в обоих случаях удовлетворительно устраняется на практически одних и тех же режимах. Следует однако иметь в виду, что в конструкциях малой жесткости, в том числе в цилиндрических оболочках средней длины (практически, когда длина равна диаметру или меньше его, а отношение диаметра к толщине превышает 100), продольный из-

Изгиб может быть весьма значительным, и обкатка между двумя одинаковыми роликами, устраняющая продольную равномерную составляющую остаточных напряжений, не приводит к полному исправлению деформаций изгиба. В этом случае целесообразно применение одного из двух технологических приемов.

1. Перед обкаткой оболочка должна быть выпрямлена вдоль образующей посредством закрепления ее в жестком приспособлении, оставляющем место обкатки доступным для роликов. После этого обкатку проводят на номинальных режимах, не учитывающих неравномерность распределения начальных напряжений по толщине. После высвобождения оболочки из приспособления никакие остаточные деформации быть не должно, если режим обкатки соответствовал номинальному. Если же имеется некоторый изгиб, не устраненный в результате обкатки в зажимном приспособлении, то следует провести повторную обкатку. Применение зажимного приспособления для повторной обкатки не обязательно.

2. Без применения зажимного приспособления при обкатке изогнутой поверхности оболочки в зоне шва деформации изгиба могут быть устранены только посредством неравномерного пластического деформирования по толщине [42]. Со стороны сжатых волокон необходимо вызвать большую пластическую деформацию удлинения, чем со стороны растянутых. Это может быть достигнуто созданием контактных напряжений различной величины на границе ролик—металл с одной и другой стороны. Выполнить это условие можно, применяя ролики разных диаметров, а именно: со стороны вогнутой поверхности — ролик меньшего диаметра, со стороны выпуклой — большего (рис. 4.3) [12]. Рекомендуемые соотношения диаметров роликов  $d_1/l_2 = 0,6...0,8$ , причем отношение меньшего из диаметров к толщине не следует принимать менее 15, учитывая возможность возникновения поверхностного наклепа при обкатке.

Особую группу представляют собой кольцевые и экваториальные швы в цилиндрических и сферических оболочках. Вследствие малой жесткости в направлении диаметра усадка сварного шва может привести к значительным местным перемещениям с образованием в околошовной зоне тонких оболочек ( $S = 0,4...0,8$  мм) деформаций потери устойчивости от сжимающих напряжений [39]. Обычно у большинства материалов из-за продольного укорочения по окружности кольцевого шва уменьшается диаметр оболочки с образованием деформаций местного изгиба оболочки. Деформации укорочения исправляются обкаткой после сварки (рис. 4.4,а) [12]. Если после сварки кольцевой шов для обкатки роликами недоступен, то можно использовать предварительную раскатку кромок с целью создания деформа-

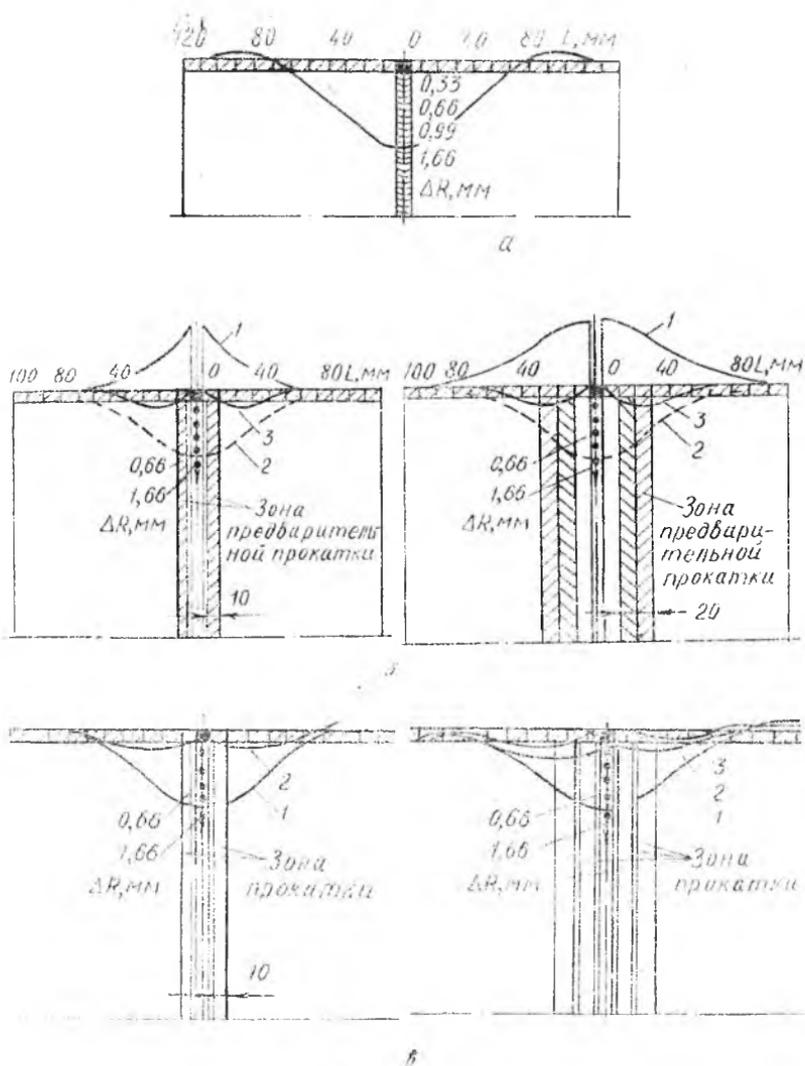


Рис. 4.4. Влияние послесварочной и предварительной обкатки на деформации от кольцевого шва ( $\Delta R$  — изменение радиуса,  $L$  — расстояние по образующей от оси шва): а — деформации оболочки с кольцевым швом, б — устранение деформаций раскаткой кромок до сварки; 1 — положение кромок после раскатки, 2 — ожидаемая деформация от сварки без применения раскатки, 3 — деформация после раскатки и сварки; в — устранение деформаций обкаткой после сварки: 1 — деформации от сварки, 2 — деформации после обкатки околошовной зоны шириной 10 мм с одной стороны, 3 — деформация после обкатки околошовной зоны шириной 20 мм с одной стороны

ций удлинения, обратных возникающим от сварки (рис. 4.4,б). При этом устранения остаточных напряжений, естественно, не происходит.

Предварительная раскатка кромок плоских листов, устраняя продольное укорочение, не предотвращает деформаций, возникающих вследствие потери устойчивости под действием собственных напряжений. В оболочке же остаточные напряжения приводят к изгибу поверхности, обратному тому, который возникает в результате предварительной раскатки кромок. В тонких оболочках и в этом случае не исключено образование деформаций потери устойчивости.

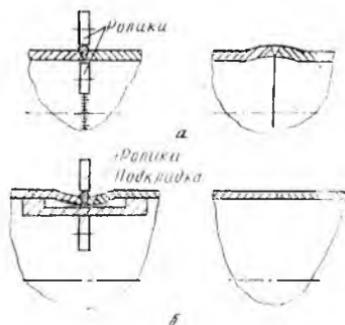


Рис. 4.5. Деформация кольцевого шва после обкатки в свободном состоянии (а) и на подкладке (б)

Уменьшить деформации удлинения зоны шва без прижатия к подкладке можно изменяя форму поперечного сечения подкладки. Если радиус кривизны подкладки в плоскости расположения шва меньше радиуса кривизны подкладки в стороне от шва, то при обкатке между роликами и подкладкой возникают условия, препятствующие деформациям удлинения вдоль шва. Возникающие при обкатке в свободном состоянии или на плоской подкладке напряжения сжатия вдоль шва после ухода ролика частично снимаются, и обкатанный металл удлиняется на некоторую величину. Удлинение металла приводит к тому, что образующая оболочки, прямая до обкатки, искривляется после обкатки, как это показано на рис. 4.5 [12]. Если с помощью ступенчатой подкладки шов несколько утопить по отношению к поверхности оболочки так, чтобы образующая оболочки занимала положение, являющееся зеркальным отражением ее профиля, полученного при прокатке в свободном состоянии, то можно получить оболочку с прямой образующей (рис. 4.5,б).

### 4.3. ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ

Ударное деформирование шва для устранения сварочных напряжений и деформаций представляет собой не что иное, как последовательно повторяющуюся осадку металла. Скорости деформирования металлов по их применению могут быть условно разделены на три диапазона:

- 1) малые (1...7 м/с, верхний предел соответствует обычной прокатке);
- 2) средние (8...100 м/с), наиболее широко применяемые;
- 3) высокие (> 100 м/с).

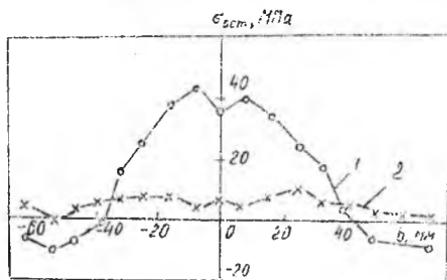


Рис. 4.6. Распределение продольных остаточных напряжений в поперечном сечении шва пластины из сплава МА-2-1: 1 — сварка + отжиг, 2 — сварка + высокоскоростная проковка (с удельной энергией деформирования  $a/S KCV = 300$  Дж/см<sup>3</sup>) + отжиг

Наиболее эффективными являются скорости 2 и 3 диапазонов. Целесообразно применение высокоскоростной проковки в сочетании с последующей термической обработкой. При этом происходит более эффективное снижение остаточных напряжений, чем при чистой термообработке (рис. 4.6) [13]. Однако применять процесс проковки целесообразно, главным образом, для тонколистовых конструкций из легких сплавов, как, впрочем, и обкатку сварных соединений.

#### 4.4. СНЯТИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПУТЕМ ИХ МЕХАНИЧЕСКОГО ВИБРИРОВАНИЯ

Сущность способа заключается в создании с помощью механических вибраторов в сварных конструкциях после сварки переменных напряжений определенной величины. Виброобработка осуществляется, как правило, на резонансных или близких к резонансным частотах в течение определенного промежутка времени. В ряде случаев виброобработку применяют вместо термической обработки, что экономичнее примерно в 10 раз, так как она имеет ряд следующих существенных преимуществ.

1. Необходимое для виброобработки оборудование является универсальным для различных конструкций, компактным и мобильным.

2. Стоимость этого оборудования, а также затрат на его обслуживание и уход за ним относительно невелики.

3. Процесс снятия сварочных напряжений протекает быстро (максимальное время обработки пятидесяти тонн деталей составляет 30 мин).

4. Поверхность деталей после обработки не претерпевает заметных физико-механических изменений (нет окислыны, шлака, цветов побежалости и т. п.). На рис. 4.7 [13] показано влияние

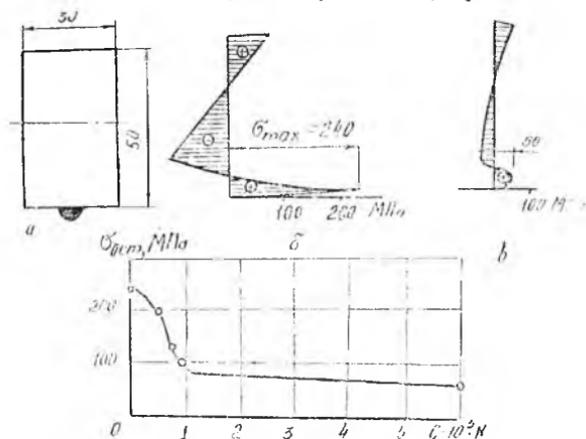


Рис. 4.7. Процесс снижения остаточных напряжений вибрацией: а — образец для испытаний; б — эпюра напряжений после сварки; в — эпюра после вибрации

числа циклов нагружения на остаточные сварочные напряжения в образцах из низкоуглеродистой стали. Переменные напряжения при этом составляют 0,056...1,28 МПа. Максимальная степень снижения напряжений приходится на  $6...8 \cdot 10^5$  циклов, и максимальные напряжения при этом снижаются с 240 до 100 МПа, т. е. на 58%.

Ряд исследователей выдвигают гипотезы, описывающие механизм протекающего процесса, проводят аналогию между снятием остаточных напряжений вибрацией и термообработкой. При этом остаточные напряжения рассматриваются как следствие перемещения атомов кристаллической решетки. С целью снижения уровня остаточных напряжений необходимо ввести энергию, которая заставит атомы перемещаться. Это может быть достигнуто искусственным нагревом или энергетическим воздействием механической вибрации.

Вибрация не оказывает влияния на величину остаточных напряжений некоторых материалов, например некоторых алюми-

ниевых сплавов. Наилучшие результаты достигаются на сталях с высоким или низким содержанием углерода, а также на нержавеющей сталях и цирконии [12].

На рис. 4.8 [13] приведены результаты исследования эффективности снижения остаточных напряжений сварных соединений из малоуглеродистой стали в зависимости от режима вибрационной обработки. Снижение остаточных напряжений представлено здесь в виде коэффициента снижения остаточных напряжений  $K$ , определяемого как

$$K = (\sigma_{\text{ост}}/\sigma_{\text{нач}}) \cdot 100. \quad (4.4)$$

В соответствии с полученными результатами вибрационная обработка позволяет почти в 4 раза снизить остаточные напряжения в сварном соединении. С увеличением амплитуды вибрационной обработки эффективность снижения остаточных напряжений возрастает. Длительность вибрационной обработки также влияет на ее эффективность, особенно в начальный момент обработки. Затем процент снижения остаточных напряжений затухает. Поэтому производить обработку более 10...20 мин малоэффективно и нецелесообразно.

Применение вибрационной обработки является одним из наиболее эффективных методов снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях [12, 13, 43—45].

#### 4.5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Высокотемпературная термическая обработка сварных конструкций — отжиг или отпуск — является наиболее радикальной с точки зрения снижения остаточных сварочных напряжений и стабилизации структуры. Для наиболее распространенных конструкционных металлов и сплавов более приемлемым на практике является высокий отпуск, так как при отжиге зачастую происходят нежелательные фазоструктурные превращения, а также из-за значительной потери упругих свойств при применяемых температурах отжига (от 800°C и выше) высока веро-

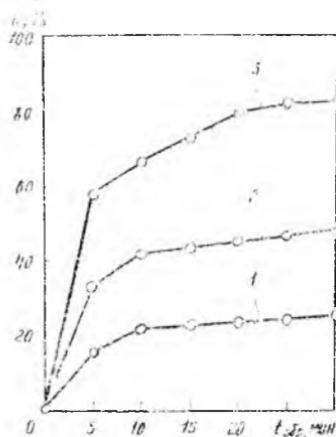


Рис. 4.8. Степень снижения остаточных напряжений при виброобработке: 1 —  $\sigma_{\Lambda} = 10 \text{ МПа}$ , 2 —  $\sigma_{\Lambda} = 20 \text{ МПа}$ , 3 —  $\sigma_{\Lambda} = 40 \text{ МПа}$

ятность деформирования маложестких конструкций под действием собственного веса.

Эффективность высокого отпуска с точки зрения снижения напряжений и стабилизации структуры для многих материалов общезвестна и подтверждена теоретически и практически в целом ряде работ и в первую очередь в монографии В. В. Винокурова [46], детально изучен механизм снижения остаточных напряжений и разработаны расчетные и расчетно-экспериментальные методы оптимизации процесса термообработки широкого круга конструкционных металлов и сплавов.

Степень полноты протекания указанных процессов зависит от химического состава и исходных свойств металла, уровня напряжений, а также от температуры и продолжительности отпуска. Назначая отпуск и основные параметры его режима, стремятся использовать перечисленные выше процессы для улучшения свойств сварной конструкции. Однако не всегда удается одновременно удовлетворить всем предъявляемым к сварной конструкции требованиям.

А. Остаточные напряжения снижают отпуском в следующих случаях:

а) если к конструкциям машиностроительного типа предъявлены такие требования в отношении точности, которые вследствие наличия остаточных напряжений не могут быть выдержаны при данной форме и жесткости детали на стадии механической обработки или при последующей эксплуатации;

б) если остаточные напряжения могут вызвать образование холодных трещин, а другие методы снижения напряжений оказываются неэффективными;

в) если дальнейшее изготовление конструкции из недостаточно пластичных металлов невозможно вследствие возникающих разрушений по причине суммирования остаточных напряжений на последующих технологических операциях либо из-за изменения внешних условий, например, понижения температуры;

г) если необходимо уменьшить накопленную потенциальную энергию в сварной конструкции;

д) если в процессе эксплуатации суммирование рабочих и остаточных напряжений приводит к разрушениям или создает условия, при которых вероятность появления разрушений становится значительной. Такие условия могут возникнуть, например, при наличии трехосных растягивающих напряжений;

е) с целью повышения вибрационной прочности за счет уменьшения растягивающих напряжений в опасных зонах конструкции;

ж) с целью повышения жесткости и устойчивости отдельных элементов или всей конструкции в целом;

з) с целью повышения коррозионной стойкости, если наличие остаточных напряжений интенсифицирует процессы коррозии или коррозионного растрескивания.

Вместе с тем, наряду с положительным эффектом могут обнаружиться дополнительные отрицательные влияния проведенного отпуска. Например, выполняя отпуск, можно существенно изменять свойства металла и, несмотря на уменьшение величины растягивающих остаточных напряжений, понижать усталостную прочность конструкции.

Влияние отпуска зависит от глубины тех изменений, которые появились в металле на предшествующих отпуску операциях термической обработки и сварки. Термическое воздействие на металл в процессе сварки — одно из наиболее сильных, но зависит от химического состава металла и термического цикла сварки. Если рассматривать эту последнюю сторону влияния по отношению лишь к закалываемым сталям, то можно отметить ряд эффектов, существенных для сварных конструкций. При быстрых охлаждениях возможно образование неустойчивых во времени структур, распад которых может привести как к сокращению, так и расширению металла. Возникает деформирование с течением времени, что в точных и недостаточно жестких деталях нежелательно. В процессе отпуска завершается распад структурных составляющих.

На примере стали У12А, прошедшей закалку, показано изменение размеров, фиксируемое на дилатограмме (рис. 4.9) [47]. Вначале при температурах 100...150°C происходит уменьшение объема металла при распаде мартенсита и переходе его в мартенсит отпуска. Наблюдается укорочение образца. Затем при  $T > 200^\circ\text{C}$  происходит распад аустенита, сопровождающийся увеличением объема. Три  $T > 300^\circ\text{C}$  образец снова сокращается вследствие реакции перехода карбида низкотемпературного отпуска в промежуточный карбид и далее в цементит. При  $T > 400^\circ\text{C}$  происходит расширение металла вплоть до структурного превращения в диапазоне точек  $A_1$ — $A_3$ . Таким образом, деформирование сварных соединений во времени можно эффективно устранить отпуском, в частности, низкотемпературным [48]. Ликвидация самопроизвольных деформаций сварных конструкций во времени — одно из положительных проявлений отпуска.

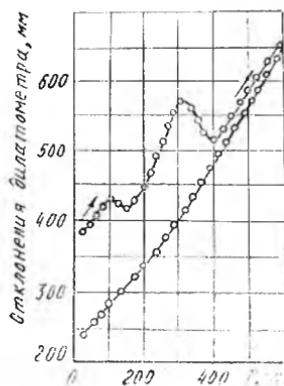


Рис. 4.9. Дилатограмма отпуска закаленной стали У12А [28]

Б. Пластические свойства металла, упрочненные в результате холодной пластической деформации или старения металла восстанавливаются отпуском в следующих случаях:

а) при наличии опасности хрупкого разрушения конструкции либо в процессе ее изготовления, либо в процессе эксплуатации. Такие условия особенно часто возникают, если имеются острые концентраторы напряжений в виде дефектов основного металла, дефектов в зоне сварного соединения или неудачно оформленных пересечений и сопряжений элементов, если металл склонен к деформационному старению (например, кипящие стали и ряд других); если металл имеет недостаточно высокие исходные пластические свойства (например, в крупных отливках и поковках); при наличии сернистых или окисных включений и т. п.; если сварное соединение окажется в условиях пониженных или низких температур, достаточных для перехода данного металла в хрупкое состояние;

б) если эксплуатация конструкций сопровождается повышенной коррозией или коррозионным разрушением в местах концентрации пластических деформаций.

В. Свойства металла, изменившиеся в результате перекристаллизации отдельных зон сварного соединения, улучшают отпуском в следующих случаях:

а) при значительной потере пластичности в процессе сварки вследствие закалки металла при высоких скоростях охлаждения, когда это может вызвать хрупкое разрушение;

б) для стабилизации неустойчивых структур, наличие которых связано с образованием холодных трещин в сварных соединениях;

в) для стабилизации неустойчивых структур, распад которых после изготовления конструкции приводит к недопустимым нарушениям точности размеров;

г) для снижения твердости металла с целью облегчения механической обработки.

Г. Восстановление форм сварных конструкций, утраченных в результате усадки металла при сварке, производят путем отпуска конструкций в зажимных приспособлениях в следующих случаях:

а) когда искажение формы конструкции носит сложный характер и трудно установить приемы правки, позволяющие устранить возникшие перемещения, например, проницаемость гибких элементов;

б) когда невозможно использовать другие методы правки из-за недоступности зон, которые должны быть подвергнуты воздействию, или из-за отсутствия специализированного оборудования;

в) если требуется высокая точность геометрических форм старинной конструкции при одновременном устраниии остаточных напряжений.

Специфика производства сварных конструкций привела к развитию различных видов отпуска, отличающихся между собой по организационно-техническим признакам, виду применяемого оборудования и очередности. Наибольшее распространение получил общий отпуск, при котором вся деталь, узел конструкции или часть детали целиком помещаются в печь и проходят отпуск. Характерной особенностью общего отпуска является примерно одинаковая во всех точках детали температура в процессе выдержки.

Местный отпуск состоит в нагреве отдельных участков сварной конструкции по необходимому термическому циклу обработки. Местному отпуску в литературе уделяется значительное внимание [49—52] из-за ббльшей сложности этого вида термической обработки по сравнению с общим отпуском. Средства нагрева весьма многообразны: твердое топливо [53], газовое пламя [54], токи промышленной и высокой частоты [55—57], ток, проходящий через нагреваемую деталь, и др. Конструктивное оформление нагревательных устройств также весьма многообразно [54]; переносные, приспособленные к форме термически обрабатываемой детали; гибкие, позволяющие придать нагревательному элементу необходимую форму; специально создаваемые на период термической обработки устройства.

В результате местного отпуска неизбежно возникают новые собственные напряжения [58, 59]. Они образуются как при нагреве (но могут релаксировать во время выдержки), так и при остывании, переходя в остаточные собственные напряжения. Несмотря на это обстоятельство, местный отпуск применяют не только для изменения свойств металла, но и для снижения или перераспределения остаточных напряжений. Проводя местный отпуск только с целью улучшения свойств металла, обычно стремятся получить также и более низкие напряжения. Если одним из основных требований является уменьшение остаточных напряжений, то особое внимание уделяется условиям местного отпуска. В таких случаях могут быть использованы следующие приемы.

1. Выбор достаточно широкой зоны равномерного нагрева для того, чтобы собственные напряжения при стыковании образовались в основном за пределами сварного соединения. Такой прием часто используют при местной термической обработке элементов стержневого типа, соединенных сваркой [60].

2. Использование высокой гибкости термообрабатываемого элемента, сокращение которого при остывании не вызовет обра-

зования значительных собственных напряжений [61—63]. При термообработке труб и оболочек такой прием весьма эффективен.

3. Создание при термообработке такой формы температурной кривой, которая обеспечит невысокие остаточные напряжения.

4. Проведение одновременного нагрева двух или нескольких стыков при термообработке в замкнутом контуре [51] (рис.4.10).

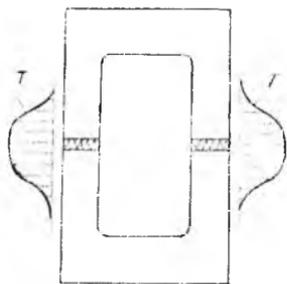


Рис. 4.10. Пример одновременного проведения местного отпуска в замкнутом контуре

5. Уменьшение тепловложения с целью снижения реактивных сил, если термическая обработка проводится в жестком контуре (заделке) или если в замкнутом контуре невозможно нагреть симметричный участок. Ряд рекомендаций для этого случая сформулирован в работе [61].

Особое положение между общим и местным отпуском занимает разновидность отпуска, при котором нагреву подвергается все поперечное сечение элемента, а источник нагрева медленно перемещается вдоль элемента. Такой прием используют для отпуска цилиндрических оболочек. Вся деталь или конструкция подвергается отпуску последовательными участками. Кольцевой шов подвергается отпуску при неподвижном источнике нагрева и медленном вращении оболочки.

Применяют так называемый промежуточный отпуск. В этом случае после выполнения очередного шва или укладки нескольких слоев проводят отпуск, не ожидая полного завершения сварки. Необходимость в таком виде отпуска появляется при следующих обстоятельствах:

наличии опасности образования холодных трещин при вылеживании;

возможности возникновения хрупких разрушений при полном остывании сварного соединения вследствие низкотемпературной хрупкости металла;

дополнительных напряжениях и пластических деформациях от очередных слоев или швов, способных вызвать разрушение металла, например, при сварке многослойных швов больших толщин;

перед укладкой очередного шва, который пересекает ранее уложенные швы, требующие улучшения механических свойств.

Промежуточный отпуск может быть как общим, так и местным.

Температура отпуска является решающим фактором в до-

стижении необходимого уровня снижения напряжений. Она должна устанавливаться в каждом отдельном случае на основании испытаний на релаксацию в зависимости от марки металла и допустимых остаточных напряжений. В обычных случаях при выборе температуры отпуска, обеспечивающей значительное снижение напряжений, можно ориентироваться на данные, приведенные ниже [46]:

Магниево-алюминиевые сплавы	523 ... 573
Алюминиевые сплавы	523 ... 573
Титановые сплавы	823 ... 873
Углеродистые, низко- и среднелегированные стали	853 ... 953
Аустенитные стали	953 ... 1323
Никобиевые стали	1373 ... 1473

В различных зонах сварного соединения остаточные напряжения разные. По мере нагрева соединения снижение их происходит с различной скоростью деформации, зависящей от соотношения исходного уровня напряжений и диаграммы материала при повышенной температуре. Поэтому уровень напряжений в зоне пластических деформаций сварного шва выравнивается в процессе нагрева. Например, если при температуре 800 К между напряжениями, имеющими неодинаковые величины в исходном состоянии, еще существует значительная разница (рис. 4.11) [12], то при температуре 900 К они отличаются меньше. Как правило, основное снижение напряжений происходит в процессе нагрева и выравнивания температуры.

При термообработке тонкостенных конструкций в фиксирую-

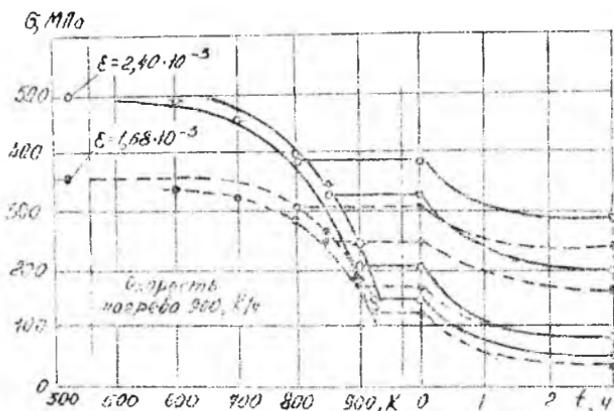


Рис. 4.11. Снижение напряжений в образцах в процессе нагрева и выдержки при температурах отпуска низкоуглеродистой стали

щих их размеры и форму приспособлений обычно не возникает проблем, связанных с определением продолжительности отпуска. Для снятия напряжений применяют кратковременный нагрев до температур, при которых упругие свойства резко уменьшаются. При этом происходит снятие напряжений как от сварки, так и от фиксации конструкции в приспособлении. Обычно основная продолжительность отпуска тонкостенных конструкций толщиной до 10 мм не превышает 60 мин, если наряду со снятием напряжений и восстановлением формы конструкции не преследуются другие цели (искусственное старение и т. д.). На рис. 4.12 [12] приведена диаграмма, показывающая влияние кратковременного нагрева (в течение 15 мин) на величину остаточных напряжений в сварном соединении стали толщиной 5 мм.

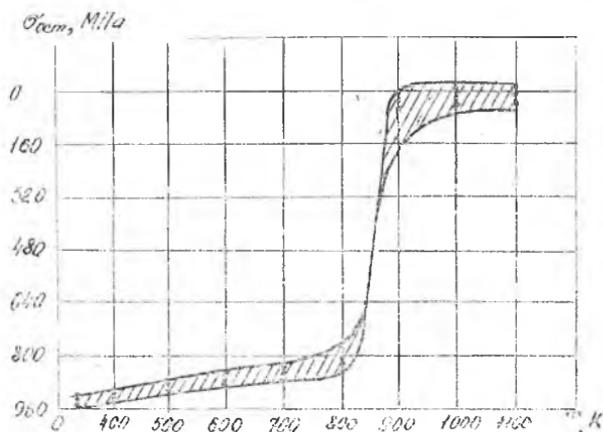


Рис. 4.12. Влияние кратковременного нагрева на уровень остаточных напряжений в сварных соединениях стали ОХ23С2Ю

На основании изложенного можно прийти к выводу, что эффективность применения того или иного метода зависит от таких многочисленных факторов, как физико-механические свойства металла, исходные остаточные напряжения, геометрия изделия, вид обработки, тип соединения, себестоимость и техническое оснащение предприятия. При выборе наиболее рационального метода обработки соединения можно руководствоваться данными таблицы [44] с учетом конкретных условий производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров Б. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформаций: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1982. 272 с.

2. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Петров И. М. Напряжения и деформации при сварке. Киев: Вища школа, 1987. 246 с.
3. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
4. Троцюк И. И. Внутренние усилия и деформации при сварке. М.: Машгиз, 1964. 215 с.
5. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1971. 286 с.
6. Рыкалин Н. П. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 286 с.
7. Волченко В. Н., Ямпольский В. М., Винокуров В. А. и др. Теория сварочных процессов: Учеб. пособие для вузов по ТЗЗ спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / Под ред. В. В. Фролова. М.: Высш. шк. 1988. 559 с.
8. Рыкалин Н. П. Тепловые основы сварки. Ч. 1: Процессы распространения тепла при дуговой сварке. М.: Изд. АН СССР, 1917. 271 с.
9. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.
10. Николаев Г. А. Расчет сварочных соединений и прочность сварных конструкций. М.: Высш. шк., 1965. 451 с.
11. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. 2. М.: Металлургия, 1976. 599 с.
12. Сагалевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1974. 248 с.
13. Сагалевич В. М., Савельев В. Ф. Стабильность сварных соединений в конструкциях. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
14. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование сварных конструкций. М.: Высш. шк., 1971. 760 с.
15. Окерблом Н. О. Расчет деформаций металлоконструкции при сварке. М.—Л.: Машгиз, 1955. 211 с.
16. Оперблук И. О., Демяниев В. П., Байкова И. П. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. Л.: Судпромгиз, 1963. 602 с.
17. Куркин С. А., Винокуров В. А., Сагалевич В. М. и др. Некоторые особенности сварки кольцевых швов обечайки из алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1966. № 10. С. 16—19.
18. Сагалевич В. М. Устранение сварочных деформаций в машиностроительных конструкциях / ПИИИ ФОРМТЯЖМАШ, М.: 1969. 74 с.
19. Столбов В. И. Сборка кольцевого стыка цилиндра емкости под сварку // Сварочное производство. 1968. № 7. С. 14—16.
20. Столбов В. И., Масаков В. В., Сидоров В. П. Изучение напряженного состояния кромки при сборке кольцевых стыков под сварку на различных подкладных кольцах // Сварочное производство. 1978. № 7. С. 7—9.
21. Сагалевич В. М., Швецов В. А. Деформация при сварке кольцевых швов тонкостенных оболочек // Сварочное производство. 1970. № 5. С. 8—10.
22. Моисеев И. Г. Влияние сборочных напряжений на качество кольцевых соединений из алюминиевых сплавов // Сварочное производство, 1973. С. 23—25.
23. Столбов В. И., Мессаев Р. В. Повышение качества кольцевого шва при сварке тонкостенных оболочек из сплава В1-20 // Сварочное производство. 1976. № 3. С. 25—26.
24. Симоник А. Г., Куркин С. А., Мешайкин Н. С. и др. Технологические пути обеспечения высокой конструктивной прочности сварных сосудов из титановых высокопрочных сталей // Остаточные напряжения и прочность сварных соединений. М.: Машиностроение, 1969. С. 14—21.
25. Там же. Макаров И. И., Емельянова Т. М. Концентрация напряжений в сварных стыковых соединениях со смещением кромок. С. 29—41.
26. Сагалевич В. М., Вершинский А. В. Расчет остаточных напряжений

круговых сварных швов в пластинах // Изв. вузов. 1968. № 6. С. 189—194.

27. Сагалевич В. М., Вершинский А. В. Перемещение сферической оболочки при сварке круговых швов // Остаточные напряжения и прочность сварных соединений. М.: Машиностроение, 1969. С. 92—104.

28. Вершинский А. В., Панферов П. М., Швецов В. А. Способы устранения сварочных деформаций от круговых швов в элементах малых толщин // Остаточные напряжения и прочность сварных соединений. М.: Машиностроение, 1969. С. 155—165.

29. Казимиров А. А., Недосека А. Я., Пархоменко И. В. и др. Остаточные деформации при вварке фланцев в пологие сферические оболочки // Автоматическая сварка. 1972. № 3. С. 27—29.

30. Жданов И. М., Чертов И. М., Карпенко А. С. и др. Влияние предварительного упругого выгиба на деформации сферической оболочки при вварке фланца // Автоматическая сварка. 1974. № 6. С. 31—33.

31. Касаткин Б. С., Лобанов Л. М., Павловский В. И. и др. Предварительное упругое деформирование околошовной зоны при вварке фланцев в цилиндрические оболочки // Автоматическая сварка. 1978. № 11. С. 54—58.

32. Жданов И. М., Карпенко А. С., Чертов И. М. и др. Определение напряженного состояния сферической оболочки при упругом выгибе, компенсирующем сварочные деформации // Автоматическая сварка. 1980. № 1. С. 5—7.

33. Лобанов Л. М., Павловский В. И., Касаткин В. С. и др. Применение предварительного кругового выгиба для уменьшения коробления при сварке круговых швов в тонкостенных сферических оболочках // Автоматическая сварка. 1982. № 11. С. 37—42.

34. Лобанов Л. М., Павловский В. И., Касаткин Б. С. и др. Расчет напряжений и деформаций сферической оболочки при упругом выгибе под сварку кругового соединения // Автоматическая сварка. 1983. № 2. С. 1—10.

35. Лобанов Л. М., Павловский В. И., Касаткин Б. С. Исследование, особенностей образования напряжений и деформаций при выполнении круговых сварных соединений в оболочках из алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 1983. № 4. С. 1—10.

36. Исвожилов В. В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1962. 431 с.

37. Лобанов Л. М., Махненко В. И., Великованенко Е. А. и др. О параметрах предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам // Автоматическая сварка. 1988. № 9. С. 1—4.

38. Махненко В. И., Великованенко Е. А. Расчет напряжений и деформаций в тонкостенной оболочке с круговыми швами // Автоматическая сварка. 1982. № 3. С. 1—8.

39. Куркин С. А., Винокуров В. А. Устранение коробления тонкостенных сварных конструкций прокаткой роликами // Сварка цветных сплавов, редких металлов и пластмасс. М.: Оборонгиз, 1961. С. 186—196.

40. Куркин С. А. Технология изготовления сварных конструкций. М.: Машгиз, 1962. 152 с.

41. Хенкин М. П., Локшин И. Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974. 254 с.

42. Сагалевич В. М., Кандаков Г. Ф., Милехин Е. С. Сварочные деформации и напряжения в конструкциях алюминиевых и магниевых сплавов // НИИИ ФОРМТЯЖМАШ. М.: 1971. 40 с.

43. Грузд А. А., Зубченко О. И., Казимиров А. Я. и др. Снижение сварочных напряжений в пластинах с помощью вибраций // Автоматическая сварка. 1972. № 7. С. 75—76.

44. Недосека А. Я., Грузд А. А., Зубченко О. И. и др. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений // Автоматическая сварка. 1974. № 3. С. 66—69.

45. Миньков Н. С., Мозильнер М. Н., Полнов В. Г. Влияние обработки сварочным нагревом на размерную стабильность сварных узлов // Сварочное производство. 1980. № 2. С. 26—28.
46. Винокуръев В. А. Отпуск сварных конструкций при снятии напряжений. М.: Машиностроение. 1973. 215 с.
47. Перляков В. Г., Белоус М. В. О природе объемного эффекта третьего превращения при отпуске закаленной стали // Изв. вузов, Черная металлургия. 1960. № 12. С. 99—105.
48. Мордвинцева А. В. Превращение остаточного аустенита — основная причина деформирования сварных конструкций с течением времени // Металловедение и обработка металлов. 1956. № 7. С. 48—54.
49. Бендер Д. Ю., Жуковский В. Е. Индукционное оборудование для нагрева под местную термическую обработку сварных соединений крупногабаритных узлов энергетических установок // Всесоюз. науч.-техн. совещание по электротермии и электротермическому оборудованию. Вып. 3 / Информ. стандартэлектр., М.: 1968. С. 61—64.
50. Бирюков В. М. Индукционный подогрев и термическая обработка сварных стыков токами промышленной частоты // Технология сварочного производства. М.—Л.: Машиностроение, 1961. С. 358—375.
51. Климовкин М. М. Применение индукционного нагрева для местной термической обработки сварных соединений крупногабаритных изделий большого веса. Термообработка для индукционного нагрева / Моск. дом науч.-техн. пропаганды. М.: 1968. С. 43—64.
52. Косой М. С. Электротермообработка сварных соединений паропроводов // Тр. ЦНИИТМАШ. Новое в технологии индукционного нагрева. 1962. № 25. С. 17—30.
53. Ващуков И. А., Кононенко С. Г., Матис Г. П. и др. Печи для местной термической обработки сварных соединений // Сварочное производство. 1963. № 7. С. 30—31.
54. Купер П. Дж. Предварительный подогрев и снятие напряжений при сварке труб и резервуаров. М.: Оргэнергострой. 1962. 18 с.
55. Климовкин М. М., Рабинович П. М., Селиханович И. Г. Местная термическая обработка паропроводов из перлитных сталей токами промышленной частоты // Сварочное производство, 1970. № 11. С. 25—27.
56. Селовских Г. Н. Зональная индукционная термообработка сварных швов // Сварочное производство. 1965. № 12. С. 30—32.
57. Яковлев В. А., Лыкова З. В., Дубровский С. М. Индукционный локальный отжиг сварных соединений из высокопрочных и жаропрочных сталей. Термообработка при индукционном нагреве / МДНТП, М., 1968. С. 36—42.
58. Новиков В. И. О местной термообработке стыковых швов для снятия остаточных напряжений // Автоматическая сварка. 1958. № 7. С. 29—35.
59. Резепови А. В. Остаточные напряжения в сварных трубчатых образцах и их влияние на прочность // Тр. / МЭИ. Вып. XXIX, 1957. С. 19—30.
60. Новиков В. И., Тутов И. Е. и др. Исследование стали 22К и разработка технологии термической местной обработки сварного соединения пластины из этой стали // Некоторые вопросы технологии тяжелого гидропрессостроения. 1960. № 8. С. 19—32.
61. Климовкин М. М. Влияние режима местной нормализации на величину собственных напряжений // Сварочное производство. 1970. № 10. С. 27—29.
62. Минасарян А. А., Артемин Г. П. Снижение уровня и благоприятное перераспределение остаточных сварочных напряжений паропроводов из стали 1Х18Н9ТТ // Теплоэнергетика. 1967. № 7. С. 78—79.
63. Шверницкий В. В., Ковтуненко В. А. Влияние местной термообработки поперечного стыкового шва труб на величину остаточных напряжений // Автоматическая сварка. 1958. № 8. С. 79—83.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
1. Деформации, напряжения и перемещения, возникающие при сварке конструкций	
1.1. Основные понятия	
1.2. Образование напряжений и деформаций при непрерывном нагреве и остывании	
1.3. Классификация сварочных деформаций	
1.4. Образование напряжений и деформаций в сварном соединении	
1.5. Определение усадочной силы	
1.6. Деформации продольного укорочения от продольных швов	
1.7. Деформации поперечного укорочения	
1.8. Угловые деформации	
2. Тепловые процессы при сварке	
2.1. Теплопередача в твердом теле	
2.2. Основы расчета процессов распространения тепла при сварке	
2.3. Влияние режима сварки и теплофизических свойств металла на поле температур	
3. Взаимосвязь конструктивно-технологического проектирования узлов ЛА и их изготовления на стадии сборочно-сварочного производства	
3.1. Конструктивно-технологическое проектирование	
3.2. Методы и мероприятия по предупреждению размерной нестабильности в процессе производства	
3.3. Продольные прямолинейные, кольцевые и экваториальные швы	
3.4. Круговые швы в пластинах	
3.5. Круговые швы в сферических оболочках	
3.6. Методы снижения остаточных деформаций и напряжений в круговых швах	
4. Послеварочные пути повышения размерной стабильности	
4.1. Обкатка сварных соединений	
4.2. Обработка прямолинейных и кольцевых швов	
4.3. Высокоскоростное деформирование	
4.4. Снятие остаточных сварочных напряжений в сварных конструкциях путем их механического вибрирования	
4.5. Термическая обработка	
Библиографический список	

*Дударь Леонид Арсеньевич*

**ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ,  
ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ СВАРКЕ УЗЛОВ  
ПЛАСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Редактор Г. Ч. Антонова  
Тех. редактор Г. А. Мелеченко  
Корректор Н. С. Голубицкая

Сводный индекс 34  
Сдано в набор 22.11.90 г. Подписано в печать 10.02.91 г.  
Формат 60 × 84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура стандартная. Шрифт обычный.  
Усл. печат. 3,11. Маст. работы 3,40. Уч.-изд. л. 0,75.  
Тираж 500 экз. Заказ 30. Цена 1 руб.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королёва  
443086 Самара, Московское шоссе, 31.

---

Тип. ЭОЗ Самарского авиационного института,  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.