

М.379454

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

Московское

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ЕРМАКОВ Станислав Иванович

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ДЕФОРМИРОВАНИЮ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ
СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

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

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
ВИНОКУРОВ В.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
МАКАРОВ Э.Л.

кандидат технических наук, доцент
ПРОХОРОВ В.Н.

Ведущее предприятие указано в решении специализированного
Совета.

Защита диссертации состоится " 26 " февраля 1981 г.
на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии
и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина, ор-
дена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу:
Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим
высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища.

Ал

г.

У
специал
докт

ЮЛЬСКИЙ В.М.

И-8564

100.

М 379 454

Актуальность проблемы. Существенное влияние на качество сварных конструкций оказывают сварочные деформации и напряжения. В настоящее время разработаны теоретические и экспериментально-расчетные методы определения сварочных деформаций и напряжений, позволяющие достаточно полно описать процесс их образования. Однако для получения достоверных результатов при использовании совершенных математических методов необходимо располагать точными данными о свойствах металлов, которыми они обладают в условиях сварки, поскольку эти свойства изменяются в широких пределах в зависимости от особенностей термического цикла и деформаций металла при сварке. Наиболее важными при определении сварочных деформаций и напряжений являются характеристики сопротивляемости металла пластической деформации.

Цель работы состоит в разработке методики определения и использования характеристик сопротивляемости металла деформированию, получаемых при программированном нагружении по сварочному термодеоформационному циклу, и установлении закономерностей образования двухосных напряжений в процессе сварки.

Методы исследования включали экспериментальное определение временных и остаточных наблюдаемых деформаций, термических циклов и перемещений точек околосшовной зоны при сварке пластин; экспериментальное определение свойств металла $\sigma_{0.2}(T)$, $E(T)$, $\varepsilon_{св.}(T)$; экспериментальное определение характеристик сопротивляемости металла деформированию $\sigma_i(\dot{\sigma} \dot{\varepsilon}_{ил.}; T; t)$ при нагружении образцов по сварочному термодеоформационному циклу на специально созданной установке; расчет на ЭЦВМ "Минск-22" временных деформаций и напряжений и сварочных термодеоформационных циклов с использованием математического аппарата теории неизотермического пластического течения.

Научная новизна состоит в установлении закономерностей изменения сопротивляемости металлов деформированию в условиях сварки и закономерностей образования сварочных деформаций и напряжений. Установлено следующее:

- сопротивляемость сплава ВТИ-0 деформированию в условиях сварки вследствие развития процессов ползучести и релаксации зависит от скоростей деформаций и изменения температуры и существенно (до 1,5 раз) отличается от сопротивляемости деформированию в изотермических условиях;



- сопротивляемость стали 20Х13 деформированию зависит от структурного состояния; при отсутствии структурных превращений ее сопротивляемость пластической деформации определяется примерно уровнем условного предела текучести, полученного в изотермических условиях;

- относительно низкий уровень остаточных продольных напряжений в пластинах из сплава ВТІ-О обусловлен вскрытыми в работе причинами: искривлением поперечных сечений, вызывающим уменьшение пластических деформаций укорочения, и более быстрым ростом предела текучести по сравнению с ростом интенсивности напряжений, что исключает пластические деформации на стадии остывания;

- правильность определения экспериментально-расчетным методом двухосных напряжений в зоне структурных превращений при сварке стали 20Х13 существенно зависит от метода определения свойств стали; свойства стали необходимо получать в условиях сварочных термомеханических циклов.

Практическая ценность работы состоит в создании установки с программированными нагревом, охлаждением и деформированием плоских образцов; в разработке руководства по определению и использованию характеристик сопротивляемости металлов деформированию, получаемых в условиях сварочных термических и деформационных циклов; в разработке рекомендаций по определению усадочной силы в сварных конструкциях из сталей, испытывающих структурные превращения.

Апробация методики определения и использования характеристик сопротивляемости металла деформированию, получаемых при программированном нагружении образцов по сварочному термомеханическому циклу, и исследование закономерностей образования двухосных напряжений в процессе сварки произведены на пластинах из титанового сплава ВТІ-О и стали 20Х13. Основные положения работы доложены на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана и на конференции "Обеспечение точности сварных тонколистовых конструкций" в г. Киеве в 1977 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Выполнена на 212 машинописных страницах, содержит 77 рисунков, 4 таблицы, 93 наименования литературных источников и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе I рассматриваются методы определения временных деформаций и напряжений при сварке и используемые при этом свойства

металлов.

К настоящему времени различными исследователями разработаны экспериментальные, экспериментально-расчетные и расчетные методы определения сварочных деформаций и напряжений. Поскольку процесс образования сварочных деформаций и напряжений происходит в условиях сложного, термомеханического нагружения и сложного характера изменения теплофизических и механических свойств металла, развитие методов определения сварочных деформаций и напряжений шло в направлении более правильного отображения механизма деформирования металла и использования свойств металла, соответствующих условиям сварки.

Наиболее совершенными являются расчетные и экспериментально-расчетные методы определения временных деформаций и напряжений, использующие математический аппарат теории пластичности. Эти методы позволяют описать сложное напряженно-деформированное состояние металла в процессе сварки. Необходимым условием получения точных результатов при этом является использование свойств металла, которыми он обладает в конкретных термомеханических условиях сварки.

В большинстве методов свариваемый металл представляется в виде идеального упруго-пластического материала, и его сопротивляемость развитию пластической деформации определяется зависимостью предела текучести от температуры.

Чтобы учесть условия деформирования металла и происходящие при этом физические процессы многие исследователи создавали специальные установки для определения сопротивляемости металла деформированию. Эти установки по принципу работы можно объединить в три группы: 1) для нагрева образцов по имитированному сварочному термическому циклу и деформирования с постоянной скоростью (Шоршоров М.Х., Ruge J.) ; 2) для нагрева образцов по имитированному сварочному термическому циклу в условиях жесткой заделки (Прохоров Н.Н., Satoh K.); 3) для нагрева и деформирования образцов по программе (Inagaki M., Прохоров Н.Н., Винокуров В.А. и Григорьянц А.Г.). Все указанные установки обладали недостатками, затруднявшими их применение для целей определения сварочных деформаций и напряжений.

Основными задачами, которые решались в работе, были следующие:

1. Разработка установки для воспроизведения сварочных термомеханических циклов на плоских образцах.

2. Разработка методики получения характеристик сопротивляе-

мости металла деформированию с помощью созданной установки.

3. Установление основных закономерностей поведения металла при сварке.

4. Использование получаемых характеристик для определения деформаций и напряжений в процессе сварки с применением математического аппарата теории неизотермического пластического течения.

5. Установление основных закономерностей образования деформаций и напряжений в процессе сварки при плоском напряженном состоянии.

6. Разработка с использованием полученных результатов формул для инженерных расчетов величины усадочной силы в сварных соединениях из сталей, испытывающих структурные превращения.

В главе 2 представлена методика определения характеристик сопротивляемости металла деформированию для исследования сварочных деформаций и напряжений.

В точках свариваемого тела в общем случае создается сложное напряженно-деформированное состояние. При экспериментальном моделировании сварочных термдеформационных условий практически невозможно воспроизводить все компоненты деформаций. Поэтому деформирование осуществлялось по простой схеме нагружения, а для перехода от фактического сложного напряженно-деформированного состояния к простому в испытаниях использовалась теория неизотермического пластического течения. Весь процесс от начала сварки и до полного охлаждения металла после сварки разбивается на серию шагов. Интенсивность деформаций ε_i , характеризующая напряженно-деформированное состояние исследуемой точки тела и реализуемая в образце на шаге от состояния $(K-I)$ до состояния (K) , определяется по формуле

$$\varepsilon_{i(K)} = \frac{\sigma_{i(K)}}{3G_{(K)}} + \int d\bar{\varepsilon}_{i_{пл.}} \quad (I)$$

где $\sigma_{i(K)}$ - интенсивность напряжений,

$G_{(K)}$ - модуль упругости при сдвиге,

$\int d\bar{\varepsilon}_{i_{пл.}}$ - интеграл интенсивностей приращений пластических деформаций.

Воспроизводимое в образце изменение температур $T(t)$ и интенсивности деформаций $\varepsilon_i(t)$ (I), определяемой по теории неизотермического пластического течения, называется сварочным термдеформационным циклом. Сварочные термдеформационные циклы в ряде случаев целесообразно воспроизводить на плоских образцах при деформировании по одноосной схеме нагружения.

Наблюдаемая деформация $\epsilon_{1n(k)}$, воспроизводимая на образце в момент времени (k), выражается формулой

$$\epsilon_{1n(k)} = \frac{\sigma_{1(k)}}{E(k)} + Sd\bar{\epsilon}_{инл.} + \epsilon_{св(k)} \quad (2)$$

где E — модуль упругости I рода,

$\epsilon_{св.}$ — свободная деформация при сварочном термическом цикле.

При расчете сварочного термдеформационного цикла в первом приближении используются свойства металла $\sigma_{0.2}(T)$, $E(T)$, $G(T)$, μ , определенные при статических испытаниях в изотермических условиях. Диаграмма деформирования металла представляется в виде диаграммы идеального упруго-пластического тела. При воспроизведении сварочного термдеформационного цикла определяется сопротивляемость металла деформированию, отражающая особенности нагружения металла и влияние происходящих при этом физических процессов. Полученные характеристики сопротивляемости деформированию используются вместо величин $\sigma_{0.2}$ в расчетах сварочных термдеформационных циклов второго приближения. Циклы первого и второго приближения сравниваются и в случае значительного различия выполняется следующее приближение для уточнения свойств металла.

Характеристики сопротивляемости металла деформированию представляются для конкретных температур в виде

$$\sigma_i = \sigma_i(Sd\bar{\epsilon}_{инл.})$$

Получаемые характеристики используются при определении сварочных деформаций и напряжений.

В случае экспериментального определения продольных сварочных напряжений σ_x в предположении одноосного напряженного состояния на установке достаточно воспроизвести деформацию $\epsilon_{1n}(t)$ равную $-\epsilon_{xn}(t)$ совместно с термическим циклом $T(t)$. Определяемая в эксперименте сопротивляемость деформированию $\sigma_1(t)$ численно соответствует продольным напряжениям $\sigma_x(t)$.

При расчетном определении сварочных деформаций и напряжений методами, использующими математический аппарат теории течения, выбирается ряд продольных сечений в зоне упруго-пластических деформаций, для которых рассчитываются сварочные термдеформационные циклы. Вначале расчет выполняется с использованием свойств металла $\sigma_{0.2}(T)$, $E(T)$, полученных при статических испытаниях в изотермических условиях. Далее для отыскания точного решения задачи используются два подхода. При первом подходе производится уточнение характеристик сопротивляемости металла деформированию

путем воспроизведения сварочных термомеханических циклов, а затем с использованием полученных характеристик уточняется решение задачи. При втором подходе в решении задачи используются комплексные характеристики, определяемые путем линейной аппроксимации значений сопротивляемости деформированию при воспроизведении трех термомеханических циклов: основного с деформацией $\epsilon_i(t)$ и дополнительных с деформацией $0,8 \epsilon_i(t)$ и $1,2 \epsilon_i(t)$. Комплексные характеристики представляются для шага деформирования из состояния $(K - I)$ до состояния (K) в виде

$$\sigma_{i(K)} = A_{(K)} + B_{(K)}(\epsilon_{i_{пл.(K)}} + \Delta \bar{\epsilon}_{i_{пл.}}); \quad (4)$$

где $\epsilon_{i_{пл.(K)}}$ — накопленная на предыдущих шагах пластическая деформация,

$\Delta \bar{\epsilon}_{i_{пл.}}$ — интенсивность приращений пластических деформаций на данном шаге.

В расчете используются величины коэффициентов $A_{(K)}$ и $B_{(K)}$ линейной зависимости (4).

Для случая экспериментально-расчетного определения сварочных деформаций и напряжений при плоском напряженном состоянии целесообразно использовать метод, разработанный Винокуровым В.А., Григорьянцем А.Г., Шубладзе Т.Г. В работе представлено применение данного метода с записью формул в наиболее часто встречающейся форме и с использованием характеристик сопротивляемости металла деформированию, определяемых при воспроизведении сварочных термомеханических циклов по одноосной схеме нагружения.

В главе 3 дается описание установки для воспроизведения сварочных термомеханических циклов на плоских образцах при одноосной схеме нагружения.

Разработанная установка позволяет одновременно и синхронно воспроизводить на плоских (стержневых) образцах программированные циклы температур путем нагрева проходящим током и программированные циклы деформаций по одноосной схеме нагружения, характерные для сварки плавлением. Установка позволяет производить нагрев со скоростью до 200 К/с, охлаждение со скоростью до 30 К/с, с точностью воспроизведения ± 10 К и деформирование с максимальной скоростью 0,005 I/с при точности воспроизведения $\pm 0,0001$.

Управление циклами температур и деформаций выполнено по схемам следящих систем. В качестве программного устройства использована электронная клеточная моделирующая машина типа МН-7. В качестве датчиков обратной связи использованы термомпара и индуктив-

ный датчик, установленный на рычажном деформометре.

Установка может быть использована для широкого круга исследований: воспроизведение сварочных термомодеформационных циклов; определение механических характеристик $\sigma(\epsilon)$, $\sigma_{0.2}(T)$, $E(T)$; определение дилатограмм $\epsilon_{св}(T)$ при сварочных термических циклах; испытания на релаксацию и ползучесть; имитирование термомодеформационного воздействия сварки на образцах для последующего изучения структуры, длительной прочности, коррозионной стойкости и т.д.

В главе 4 изложены результаты исследования сопротивляемости металлов деформированию в условиях сварочных термомодеформационных циклов.

Ввиду того, что сопротивляемость металлов деформированию зависит от большого числа факторов, таких как температура, скорость ее изменения, характер цикла нагружения, диапазон скоростей деформаций, структурное состояние металла и другие, в настоящей работе было признано целесообразным исследование сопротивляемости металлов деформированию проводить при термомодеформационных циклах, которые близки к сварочным при изготовлении сварных конструкций. Такие циклы (отличие не более 5%) создавались в пластинах, размеры которых выбирались достаточно большими путем предварительных расчетов.

Исследования проводились на титановом сплаве ВТ1-0 и на стали 20Х13. В экспериментах производилось проплавление пластин посередине вольфрамовым электродом в среде аргона на двух скоростях сварки (0,001 и 0,01 м/с для ВТ1-0 и 0,001 и 0,006 м/с для 20Х13). Для анализа напряженно-деформированного состояния при сварке отдельных точек пластины, расположенных на различном расстоянии от оси шва, использовался экспериментально-расчетный метод определения собственных деформаций и напряжений при плоском напряженном состоянии. Экспериментально при сварке регистрировались наблюдаемые деформации по трем направлениям, термические циклы, продольные перемещения точек для каждого рассматриваемого волокна. На разработанной установке экспериментально определялись $\sigma_{0.2}(T)$, $E(T)$, $\epsilon_{св}(T)$. Расчет собственных деформаций и напряжений и сварочных термомодеформационных циклов производился на ЭЦМ "Минск-22".

Для установления закономерностей изменения сопротивляемости металла деформированию воспроизводились на разработанной установке для каждой исследуемой точки три термомодеформационных цикла: основной и отличающиеся от основного примерно на +20% и -20% по величине собственной деформации. Термические циклы были одинаковыми. При

анализе сравнивались для одинаковых температур зависимости $\sigma_1(\dot{\epsilon}_{\text{дл.}})$, полученные статическими испытаниями ($\dot{\epsilon}_1 = 3 \cdot 10^{-4} 1/c$) в изотермических условиях и полученные в условиях, соответствующих сварочным.

На титановом сплаве ВТ1-0 показано, что при повышении температур происходит резкое снижение условного предела текучести, наблюдается существенная разница между условным пределом текучести и пределом пропорциональности. Использование в расчетах диаграмм идеального упруго-пластического тела может вносить заметные неточности в результаты. Ввиду склонности титанового сплава к ползучести его сопротивляемость деформированию в сварочных термодинамических условиях существенно зависит от мгновенных скоростей деформирования и температуры, соответствующих различным точкам тела и условиям сварки. При низких температурах и больших скоростях деформирования его сопротивляемость значительно выше (до 1,5 раз) получаемой статическими испытаниями в изотермических условиях, а при высоких температурах и малых скоростях деформирования существенно ниже. Если на стадии охлаждения при сварке в некоторых случаях все же протекают пластические деформации, то сопротивляемость деформированию приблизительно равна пределу текучести (рис.1).

На стали 20Х13 показано, что условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ при одних и тех же температурах испытания $T_{\text{исп.}}$, но в одном случае при нагреве от комнатной температуры до $T_{\text{исп.}}$, а во втором случае при нагреве по сварочному термическому циклу (с $T_{\text{max}} > A_{c3}$) до $T_{\text{исп.}}$, разный. Предел текучести и сопротивляемости стали деформированию существенно зависит от ее структурного состояния. Сопротивляемость стали деформированию в условиях сварочных термодинамических циклов с $T_{\text{max}} < A_{c1}$ при протекании пластических деформаций примерно соответствует уровню предела текучести.

При анализе напряженно-деформированного состояния при сварке для сплава ВТ1-0 и стали 20Х13 (при $T_{\text{max}} > A_{c1}$) необходимо использовать уточняемые при воспроизведении сварочных термодинамических циклов характеристики сопротивляемости металла деформированию.

Совместно с сотрудниками из ГДР для некоторых сталей проведено сравнение результатов опытов по изучению их сопротивляемости деформированию, полученных на установках МВТУ и ГДР. Показано, что на установках, имитирующих сварочное термодинамическое воздействие в условиях постоянной жесткости, получаются результаты, не отличающиеся от результатов, полученных при сварочных термодинамических циклах на установке МВТУ.

В главе 5 представлены результаты исследования закономерностей образования деформаций и напряжений при сварке сплава ВТІ-0 и стали 20ХІ3.

Исследование сварочных деформаций и напряжений в пластинах из сплава ВТІ-0 в предположении плоского напряженного состояния показало, что при сварке имеют место значительные сдвиговые деформации γ_{xy} и поперечные напряжения σ_y . Уровень остаточных максимальных продольных напряжений существенно ниже $\sigma_{0,2}$. Пластические продольные деформации на стадии нагрева вследствие искривления поперечных сечений значительно меньше (до 40%) по сравнению с условиями жесткой заделки. При сварке на малых скоростях ($V_{св.} = 0,001$ м/с) существенную роль в формировании напряженного состояния играют поперечные напряжения σ_y . На стадии охлаждения высокие сжимающие напряжения σ_y вызывают развитие высоких сжимающих продольных напряжений σ_x и даже создают (при 500... 400°C) возможность протекания незначительных пластических продольных деформаций укорочения. Измеренные продольные перемещения точек пластины показали, что при сварке имеют место значительные искривления поперечных сечений. Характер искривления поперечных сечений на разных скоростях разный (рис.2 и 3).

На пластинах из стали 20ХІ3, испытывающей при сварке мартенситное превращение, с помощью экспериментально-расчетного метода исследовано образование плоского поля напряжений при сварке. Показано, что для получения достоверных результатов в зоне структурных превращений необходимо расчет выполнять даже в первом приближении с использованием $\sigma_{0,2}$, найденных после соответствующего данному моменту времени термического цикла. Существенное уточнение получается при использовании характеристик сопротивляемости металла деформированию, определенных из эксперимента по воспроизведению сварочного термдеформационного цикла. Вне зоны структурных превращений подобное уточнение незначительно. Неоднозначность напряженного состояния наиболее сильно выражена для зоны, где $T_{max} > 500^\circ\text{C}$.

Для инженерных расчетов деформаций сварных конструкций из сталей, испытывающих структурные превращения, разработаны формулы определения усадочной силы $P_{ус.}$. Формулы позволяют связать $P_{ус.}$ в конструкции конечной жесткости с $P_{ус.д.ж.}$ в "абсолютно жесткой" конструкции при одних и тех же режимах сварки. Предложена рациональная процедура определения усадочной силы в сварной конструкции с использованием экспериментальных данных, полученных на сварном образце.

ВЫВОДЫ

1. Особенности деформации металла и протекания физических процессов при сварке в условиях резкого изменения температур наиболее полно создаются при механических испытаниях металла, воспроизводящих сварочные термомеханические циклы по температуре и интенсивности деформаций. Ввиду того, что существующие установки обладают недостатками, разработана специальная установка, позволяющая в плоских стержневых образцах по заранее заданным программам воспроизводить циклы температур и деформаций с максимальными скоростями нагрева до $200^{\circ}\text{K}/\text{с}$ и деформирования по одноосной схеме до $0,003 \text{ I}/\text{с}$, что соответствует условиям большинства видов сварки плавлением.

2. С использованием разработанной установки и путем исследования напряженно-деформированного состояния при сварке титанового сплава ВТ1-0 установлено следующее:

а) ввиду существенной разницы между пределом пропорциональности и пределом текучести использование диаграммы идеального упруго-пластического металла для случая расчета напряжений при сварке титановых сплавов вносит заметную ошибку;

б) на стадии нагрева в условиях сварки при больших скоростях деформирования сопротивляемость металла деформированию оказывается значительно выше (до 50%) сопротивляемости металла деформированию, определенной в изотермических условиях статических испытаниями, а при малых скоростях деформирования, наоборот, ниже, что вызвано склонностью титанового сплава к ползучести и релаксации напряжений;

в) на стадии охлаждения при сварке сопротивляемость металла деформированию, если протекают пластические деформации, приблизительно равна пределу текучести;

г) наиболее правильным представляется использование в расчетах деформаций и напряжений при сварке титановых сплавов свойств, определяемых при воспроизведении сварочных термомеханических циклов.

3. С использованием экспериментально-расчетного метода определения временных деформаций и напряжений при плоском напряженном состоянии установлены закономерности образования сварочных деформаций и напряжений в пластинах из титановых сплавов.

а) Низкий уровень остаточных продольных напряжений обусловлен вскрытыми в данной работе следующими причинами:

- на стадии нагрева при малых скоростях сварки пластические

деформации укорочения существенно меньше по сравнению с пластическими деформациями в условиях жесткой заделки, что связано с искривлениями поперечных сечений,

- на стадии охлаждения пластические деформации удлинения либо не протекают, либо возникают в небольших количествах при высоких температурах; одной из основных причин отсутствия пластических деформаций является более интенсивный рост предела текучести по сравнению с ростом интенсивности напряжений; если на стадии охлаждения протекают пластические деформации, то интенсивность напряжений примерно равна пределу текучести,

б) На больших скоростях сварки основной вклад в интенсивность собственных деформаций вносит продольная деформация ϵ_x , тогда как на малых скоростях существенный вклад вносят все компоненты деформаций.

в) При сварке пластин из сплава ВТІ-О на малых скоростях сварки на стадии охлаждения в диапазоне температур от T_{max} до 200°C образуются высокие сжимающие поперечные напряжения σ_y , которые вызывают развитие сжимающих продольных напряжений при температурах $500...400^\circ\text{C}$ и протекание, хотя и незначительных, продольных пластических деформаций укорочения при данных температурах.

4. При исследовании напряженно-деформированного состояния стали 20ХІЗ при сварке установлены закономерности изменения сопротивляемости стали деформированию:

а) величины условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, определенные при одних и тех же температурах статическими испытаниями, но с нагревом в одном случае от комнатной температуры до температуры испытания, а во втором случае с нагревом и охлаждением по сварочному термическому циклу (с $T_{max} > A_{c3}$) до температуры испытания различны. После нагрева по сварочному термическому циклу на стадии охлаждения при снижении температуры испытания до температур начала мартенситного превращения T_{Mn} предел текучести медленно нарастает, но остается низким; при температурах ниже T_{Mn} вследствие происходящих структурных превращений $\sigma_{0,2}$ в начале несколько снижается, а затем резко (более чем в 2...5 раз) возрастает;

б) характеристики сопротивляемости стали деформированию $\sigma_i (s d \bar{\epsilon}_{i_{на.}}, T)$ в условиях сварочных термдеформационных циклов с $T_{max} < A_{c4}$ при протекании пластических деформаций примерно соответствуют уровню $\sigma_{0,2}$;

в) для сталей, испытывающих структурные превращения и су-

щественно изменяющих свои свойства при нагреве выше A_{c1} , представление металла в виде идеального упруго-пластического тела со свойствами, определенными в изотермических условиях дает неправильные результаты при анализе напряженно-деформированного состояния при сварке; поэтому необходимо уточнять характеристики сопротивляемости стали деформированию путем воспроизведения сварочных термомеханических циклов.

5. С использованием экспериментально-расчетного метода определения сварочных деформаций и напряжений при плоском напряженном состоянии при сварке пластин из стали 20Х13 установлено:

а) при определении временных напряжений по теории течения при максимальных температурах нагрева ниже температур начала структурных превращений A_{c1} можно пользоваться схемой идеального упруго-пластического тела с модулем упругости $E(T)$ и пределом текучести $\sigma_{0.2}(T)$, найденными при изотермических условиях нагружения. Использование характеристик сопротивляемости металла деформированию, получаемых при воспроизведении сварочных термомеханических циклов, для уточнения решения не обязательно;

б) для точек, металл в которых испытывает структурное превращение, расчет напряжений даже на первом приближении необходимо производить с использованием величин $\sigma_{0.2}$, найденных после соответствующего данному моменту времени термического цикла. Уточнение напряжений в этом случае обязательно;

в) наиболее стабильный характер изменения имеет продольное напряжение σ_x . Оно является сжимающим на стадии нагрева и при достижении $\sigma_{0.2}$ примерно следует зависимости $\sigma_{0.2}$ от температуры. На стадии охлаждения σ_x становится растягивающим. Чем выше максимальная температура нагрева, тем меньшее изменение температуры приводит к перемене знака напряжений на растяжение;

г) для точек с температурой $T_{max} > 500^\circ C$ на стадии нагрева действуют двухосные сжимающие напряжения σ_x и σ_y . При более низких T_{max} напряжения σ_y выражены слабо. Перемена знака напряжений σ_y и τ_{xy} происходит несколько раз в течение цикла сварки и не имеет закономерного характера. В околошовной зоне развиваются значительные сдвиговые деформации γ_{xy} , величина которых возрастает при приближении к зоне структурных превращений;

д) с использованием данных о свойствах металла, полученных при воспроизведении сварочных термомеханических циклов, путем определения двухосных напряжений в процессе сварки показано, что

уровень временных напряжений существенно зависит от происходящих структурных превращений.

6. На основании литературных данных, результатов проведенных исследований и установленных закономерностей образования деформаций и напряжений при сварке сталей, испытывающих структурные превращения, разработана формула для определения усадочной силы, в которой в отличие от известных учтено влияние жесткости и принято во внимание влияние распределения температур в момент протекания структурных превращений на величину остаточных напряжений в зоне структурных превращений.

7. Рекомендована рациональная процедура определения экспериментально-расчетным путем величины усадочной силы в сварной конструкции из стали, испытывающей мартенситное превращение. Процедура заключается в том, что экспериментально определяется усадочная сила при сварке пластины малой жесткости из той же стали и при тех же режимах, как и для реальной сварной конструкции, затем с учетом данных об A_{C_1} , $B_{0,2}$ рассчитываются размеры соответствующих зон и находится усадочная сила для элемента конструкции соответствующей жесткости.

8. По заданию СЭВ разработано "Руководство по определению и использованию характеристик сопротивляемости металла деформированию, получаемых в условиях сварочных термических и деформационных циклов".

Содержание диссертации отражено в работах:

1. Ермаков С.И., Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Установка для моделирования сварочных термомеханических циклов. - Сварочное производство, 1978, № 2, с.56-57.
2. Ермаков С.И., Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Установка для определения свойств металлов в условиях сварки. - В кн.: Машины. Приборы. Стенды. Каталог № 6, МВТУ, 1978, с.61.
3. Экспериментальные исследования сдвиговых деформаций и продольных перемещений при сварке. / Винокуров В.А., Григорьянц А.Г., Шубладзе Т.Г., Ермаков С.И. - Известия вузов. Машиностроение, 1979, № 6 с.122-125.

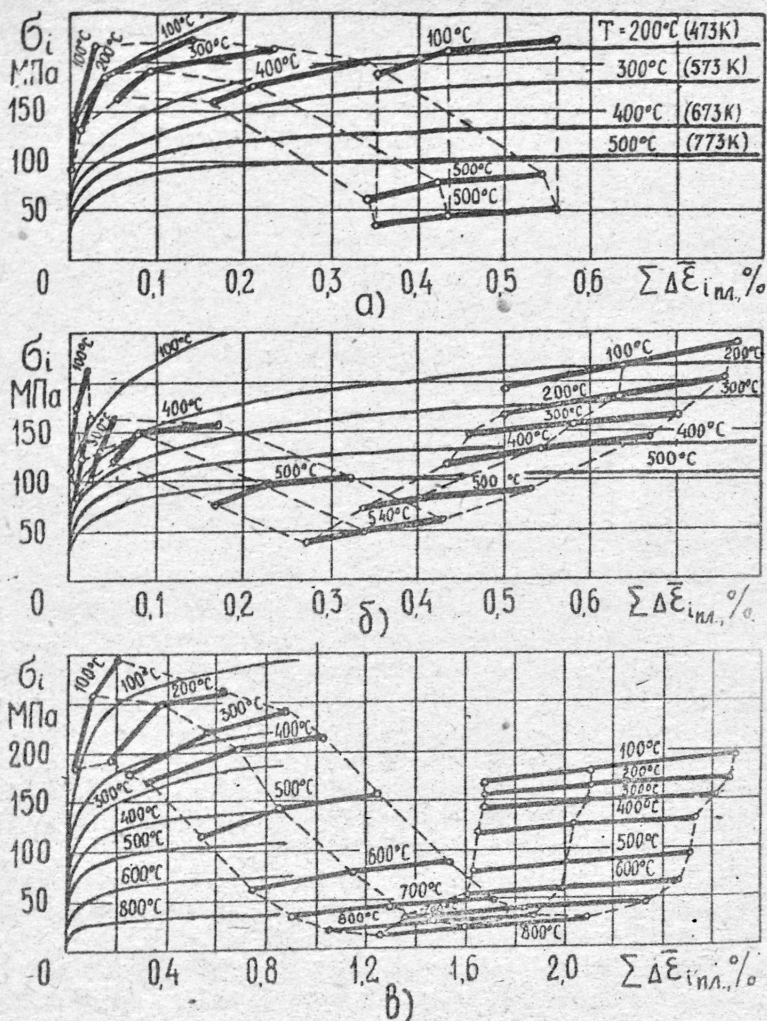


Рис. 1. Сопротивляемость титанового сплава ВТИ-0 деформированию в сварочных термомеханических условиях (—) и при изотермических испытаниях (—): а) $V_c = 0.01$ м/с, $y = 10$ мм; б) $V_c = 0.001$ м/с, $y = 20$ мм; в) $V_c = 0.001$ м/с, $y = 10$ мм.

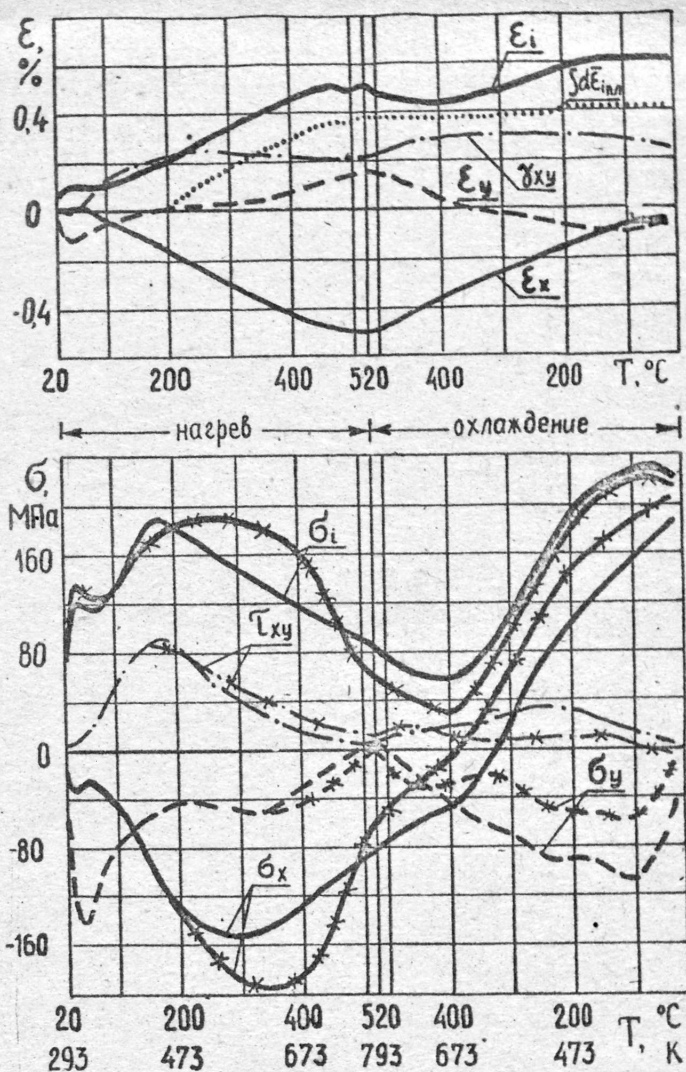


Рис. 2. Развитие сварочных деформаций и напряжений в сплаве БТИ-0 ($y = 10$ мм; $V_c = 0,01$ м/с).
 * * - результаты 2-го приближения.

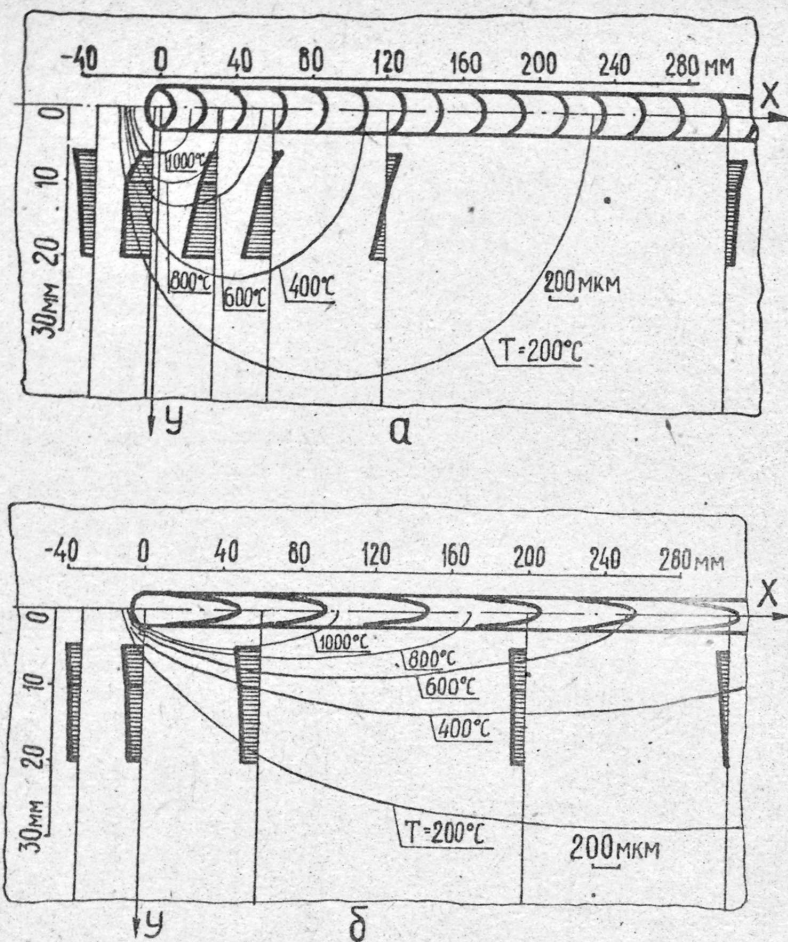


Рис. 3. Продольные перемещения (показаны штриховкой) точек пластины из сплава ВТИ-0 при сварке на скорости $V_c = 0,001$ м/с (а) и $V_c = 0,01$ м/с (б).