

М 401895
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

МЕЛЬНИКОВ Валерий Леонидович

На правах рукописи

УДК 621.791.793

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного
производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1982 г.

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

- . -

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

МЕЛЬНИКОВ Валерий Леонидович

На правах рукописи

УДК 621.791.793

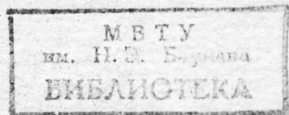
РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного
производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

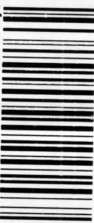
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1982 г.



М401895

НТБ МВТУ им. Н.Э. Баумана



1401895

Мельников В. Л. Разработка

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор КИСЕЛЕВ С.Н.
кандидат технических наук,
доцент ДАНИЛОВ В.Л.

Ведущее предприятие - ЦНИИТМАШ.

Защита диссертации состоится "6" 1 1983 г.
на заседании специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в I экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан " " " " 198 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
Д.Т.Н.

 В.М. Ямпольский

Л-90858

Подл. к печати 22.X. 1982 г. Объем I п.л. тир. 105 экз.
Заказ № 1301 Типография МВТУ им. Н.Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При изготовлении конструкций в тяжелом машиностроении используются способы сварки, основанные на электрошлаковом процессе. Особенности сварки, связанные с большим количеством вводимого тепла и большими толщинами, могут привести к возникновению значительных деформаций и опасного характера распределения напряжений, из-за которых детали могут уйти в брак в процессе сварки или по ее окончании.

Чтобы избежать ошибок при проектировании технологии сварки ответственных и дорогих деталей, необходимо располагать достоверными сведениями о деформациях и напряжениях в них.

Экспериментальные методы не позволяют определять напряженно-деформированное состояние в глубине металла при сварке.

Существующие расчетные методы определения перемещений деталей при электрошлаковой сварке (ЭШС) основаны на теории упругости и применимы только для определения перемещений в значительных по ширине деталях.

Цель работы. Работа посвящена разработке современных расчетных методов определения напряженно-деформированного состояния и перемещений деталей при сварке, основанных на неизотермической теории течения и методе конечных элементов, а также применению этих методов для накопления данных и установления ранее неизвестных закономерностей в распределении перемещений, деформаций и напряжений при ЭШС.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя интегрирование дифференциальных уравнений неизотермической теории течения в теории пластичности методом конечных элементов и интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных разностей.

Экспериментальный метод состоял в моделировании перемещений при ЭШС способом аргонно-дуговой сварки на тонких пластинах.

Научная новизна

I. В методы решения неизотермических упруго-пластичных задач внесены новые приемы:

а) применено вариационное уравнение, выражающее приращение полной энергии системы в случае зависимости свойств металла от температуры и используемое для формирования глобальной матрицы жесткости в методе конечных элементов;

б) разработан и применен метод определения параметров пластичности при решении неизотермических задач в теории течения, основанный на последовательном уточнении коэффициентов, связывающих приращения напряжений и приращения деформаций в линейной форме, и используемый в итерационных процессах при решении задач.

2. Установлено, что при квазистационарном поле температур, деформаций и напряжений, возникающем в процессе ЭШС относительно узких плит, поле перемещений точек свариваемых деталей в движущихся совместно с источником нагрева координатах изменяется с постоянной скоростью. В частном случае скорость изменения поля перемещений может быть равна нулю.

3. Установлено, что в процессе ЭШС деталей из элементов, имеющих значительные размеры по толщине и ширине, в нижней части шва образуются значительные растягивающие напряжения, которые могут превышать предел текучести металла.

Практическая ценность. Разработаны алгоритмы и программы для расчета термдеформационных процессов при сварке:

1) программы для расчета температурных полей по двумерной и трехмерной схеме при ЭШС;

2) программы для расчета напряженно-деформированного состояния по двумерной схеме плоской деформации или двумерной схеме плоского напряженного состояния;

3) программа для расчета напряженно-деформированного состояния трехмерных тел.

Разработанные программы позволяют определить напряжения и деформации, в том числе и объемные, непосредственно в процессе или по окончании сварки или другого термомеханического воздействия на детали с учетом различных по характеру объемных эффектов, рассчитывать возникающие перемещения, силы в скобах, "сухарях" и на опорах, учитывать влияние предварительных и сопутствующих подогревов и влияние начального напряженного состояния на указанные процессы.

Апробация работы. Разработанные алгоритмы и программы использовались для расчетного исследования влияния размеров деталей и режимов сварки на уровень напряжений и перемещений в деталях при ЭШС.

Составлен "Пакет программ для расчета напряженно-деформированного состояния тел при сварке плавлением, термообработке

и других термических воздействий", который передан ряду организаций.

Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана и на научном семинаре кафедры сварки Комсомольского на-Амуре политехнического института.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов по работе, общих выводов, списка литературы и трех приложений. Изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 2 таблицы и 88 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние вопроса

При проектировании технологии ЭШС необходимо учитывать особенности деформирования конкретной конструкции. Такую информацию могут дать экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния при ЭШС.

Первоначальные исследования перемещений крупногабаритных деталей в процессе ЭШС проводились В.А. Винокуровым, А.С. Газаряном, И.И. Сущук-Слюсаренко и др. либо на макетах, либо непосредственно при сварке плановых деталей в производственных условиях. Последнее было связано с тем, что специальные лабораторные исследования были слишком трудоемки, а потому - невозможны.

Аналитическое решение задачи о перемещениях деталей, имеющих очень большие размеры по ширине, полученное В.А. Винокуровым на основе теории упругости, позволило определять перемещения при ЭШС на различных режимах.

Характер распределения и уровень напряжений в процессе ЭШС крупногабаритных деталей до сих пор не исследовались. Определялись лишь остаточные напряжения, по которым невозможно судить о временным напряжениях, возникающих в процессе сварки.

Для исследования термдеформационных процессов при ЭШС перспективно использовать либо метод моделирования этих процессов каким-то способом сварки плавления, либо численные методы на основе неизотермической теории течения, которые следует рассматривать как методы, дополняющие экспериментальные и позволяющие получать информацию, которую невозможно получить другими способами.

При этом численные методы исследования должны учитывать:

- 1) зависимость теплофизических и механических свойств металла от температуры;
- 2) характер распределения теплоты в источнике нагрева деталей при ЭИС.

Анализ алгоритмов решения задач подобного типа, которые были разработаны В.И. Махненко, Ю.Н. Шевченко, М.Е. Бабенко, К.М. Гатовским и др. показал, что наилучшей формой связи между напряжениями и деформациями применительно к численным расчетам в не-изотермической теории течения является связь в виде "приращение напряжений – приращение деформаций".

Процедура исключения параметра пластичности из этих уравнений, которую описали Н.Н. Малинин, А.Г. Григорьянц, *J. Jamada, N. Joshimura* и др., позволяет получить линейную связь "приращение напряжений – приращение деформаций", которая, в принципе, не требует применения итерационных процессов при численном решении задач термопластичности.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Моделирование деформаций и перемещений при ЭИС узких деталей.
2. Разработка алгоритмов и программ для определения температурных полей при ЭИС.
3. Разработка алгоритмов и программ для определения напряженно-деформированного состояния тел при ЭИС.
4. Исследование перемещений деталей и напряжений в них в зависимости от их размеров и условий сварки.

Глава 2. Моделирование перемещений при электрошлаковой сварке узких плит методом аргоно-дуговой сварки

Эксперименты по моделированию перемещений проводились на пластинах ст.3 толщиной 3 + 5 мм для случаев ЭИС деталей толщиной 194 + 950 мм, шириной 171 + 981 мм при скорости 0,013 + 0,0145 см/с и мощности 41 + 214 кВт.

Оказалось, что независимо от условий экспериментов характер изменения сварочного зазора от положения источника одинаков: в начальный период сварки зазор резко раскрывается, а, начиная с некоторого момента времени, закрывается.

Общепринятые представления о характере перемещений узких деталей при сварке, основанные на допущении об одноосном напряженном состоянии, сводятся к тому, что сварочный зазор в про-

цессе сварки должен непрерывно раскрываться.

Так как полученные методом моделирования результаты в этом отношении оказались иными, их необходимо было проверить с использованием другого метода исследования.

Глава 3. Расчетный численный метод исследования перемещений, деформаций и напряжений в деталях при сварке

Задача о напряженно-деформированном состоянии тел при сварке распадается на две части: 1) расчет температурных полей; 2) собственно расчет деформаций напряжений и перемещений в деталях.

Задача о распределении тепла при ЭИС решалась с применением метода конечных разностей. При этом учитывалась зависимость теплофизических свойств металла от температуры и характер распределения теплоты в источнике нагрева деталей при ЭИС. Расчеты температурных полей приводились по двумерной и трехмерной схемам.

Основными положениями при разработке алгоритмов и программ для решения второй части задачи были следующие: 1) расчет напряжений и деформаций проводится на основе неадиабатической теории течения; 2) учитывается зависимость механических свойств металла от температуры; 3) принимается модель идеального упруго-пластического тела; 4) принимается метод конечных элементов (МКЭ) как численный метод интегрирования уравнений неадиабатической теории течения; при этом тело разбивается на треугольные или тетраэдральные элементы, в пределах которых функция перемещений точек задается линейным полиномом.

Связь между приращениями напряжений и приращениями деформаций устанавливается в виде линейной зависимости (I), в которую параметр пластичности (параметр Одквиста) в явном виде не входит.

$$\{\delta\sigma\} = [D] \{\delta\varepsilon\} + \{\Delta F\}, \quad (I)$$

где $\{\delta\sigma\}$ и $\{\delta\varepsilon\}$ - матрицы-столбцы приращений напряжений и приращений деформаций элемента тела соответственно; $[D]$ и $\{\Delta F\}$ - матрицы коэффициентов связи, которые вычисляются по разным формулам для упругих элементов и элементов, находящихся в состоянии пластической деформации.

Физические уравнения связи (I) имеют следующие два недостатка, которые особенно сильно проявляются в случае достаточно

больших по времени шагов интегрирования: 1) необходимость применения какой-либо процедуры перевода элементов из упругого состояния в пластическое и обратно; 2) уход интенсивности напряжений элемента с его поверхности пластичности на шаг решения.

В целях устранения указанных недостатков уравнений связи (I) была применена процедура, предложенная В.А. Винокуровым, которая основана на последовательном уточнении коэффициентов $[D]$ и $\{\Delta F\}$ так, чтобы выполнялись условия: 1) равенство интенсивности напряжений элемента σ_i его пределу текучести σ_T ; 2) система конечных элементов должна быть уравновешена в конце каждого шага решения.

Пусть в начале шага решения по известным $[D]_a$ и $\{\Delta F\}_a$ была сформулирована глобальная матрица жесткости и решена система линейных уравнений. Пусть для элементов, состояние которых определялось т. А или т. D на рис. I, получены приращения деформаций $\{\Delta \varepsilon\}_L$. Если шаг по нагружению достаточно велик (т. E, т. C на рис. I), то приращения напряжений для этих элементов определим численным интегрированием:

$$\{\Delta \sigma\}_E = \int_0^{\Delta t} ([D] \{\Delta \varepsilon\}_L + \{\Delta F\}) dt / \Delta t, \quad (2)$$

где Δt - шаг решения по времени; $[D]$ и $\{\Delta F\}$ - функции текущего параметра t ($0 \leq t \leq \Delta t$).

В процессе интегрирования (2) получаем приращение напряжений $\{\Delta \sigma\}_E$ и матрицу $[D]_E$ при $t = \Delta t$. Значения приращений напряжений $\{\Delta \sigma\}_E$ получены из условия $\sigma_i = \sigma_T$, но система конечных элементов оказывается в этом случае неуравновешенной.

Формируем вновь глобальную матрицу жесткости с учетом новых коэффициентов связи в (I):

$$[D]_E \quad \text{и} \quad \{\Delta F\}_E = \{\Delta \sigma\}_E - [D]_E \{\Delta \varepsilon\}_L \quad (3)$$

Решая новую систему уравнений, получим новые значения перемещений узлов, приращений деформаций и приращений напряжений (т. E, и т. C, на рис. I).

Последовательное уточнение состояния системы элементов продолжается до выполнения выбранного условия точности решения.

Для формирования глобальной матрицы жесткости в МКЭ используется уравнение, выражающее приращение энергии системы.

Проведенный совместно с А.С. Куркиным анализ показал, что в случае зависимости механических свойств металла от температуры такое уравнение имеет вид:

$$dF = 0.5 \int_V [d\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} + 3d\varepsilon_0 (\sigma_0 dK/K + K d\varepsilon_\alpha) + \chi_2 s_{ij} d\varepsilon_{ij}] dV - \int_V dp_i du_i dV - \int_{S_p} dp_i du_i dS, \quad (4)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} - компоненты тензора напряжений и деформаций соответственно; s_{ij} - компоненты девиатора напряжений; $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$, $\varepsilon_0 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)/3$, ε_α - свободная температурная деформация; $K = E/(1-2\mu)$; E - модуль Юнга; μ - коэффициент Пуассона; $\chi_2 = dG/G$ - в упругой области и $\chi_2 = d\sigma_T/\sigma_T$ - в пластической области; G - модуль сдвига; q_i и p_i - объемные и поверхностные силы соответственно; u_i - перемещения; V - объем тела; S_p - часть поверхности тела, на который действуют поверхностные силы p_i .

Глава 4. Отработка элементов программы для расчетов деформаций и напряжений при сварке

В данной главе описаны способы, которые были применены для проверки правильности разработанных алгоритмов и программ.

Программы для расчета температурных полей при ЭНС проверялись путем сопоставления результатов расчетов и результатов экспериментов по определению термических циклов.

Механическая часть задачи проверялась путем сопоставления результатов численных расчетов напряжений и деформаций в тонком диске с результатами расчетов по аналитическим зависимостям.

Проверка правильности разработанного алгоритма в целом проводилась путем сопоставления результатов расчетов и результатов экспериментов по определению перемещений деталей при ЭНС.

Глава 5. Особенности применения расчетного метода определения напряженно-деформированного состояния тел

В результате сопоставления расчетов напряженно-деформированного состояния тел при ЭНС деталей по трехмерной схеме тела, по двумерной схеме плоской деформации и по двумерной схеме плоского напряженного состояния установлено, что расчеты тер-

модеформационных процессов при ЭНС плит толщиной до 400 мм целесообразно, из соображений точности, проводить по двумерной схеме плоского напряженного состояния. В случае расчетов напряжений и деформаций при ЭНС плит толщиной более 400 мм желательно использовать трехмерную модель тела.

Показано, что при конечно-элементной дискретизации тела на треугольные или тетраэдральные симплекс-элементы следует применять два правила: 1) на участках тела, где ожидается наибольшая кривизна функции перемещений, размеры конечных элементов должны быть наименьшими; 2) предпочтительнее разбивать тело на равно-сторонние треугольники или тетраэдры с равными ребрами, чем на треугольники или тетраэдры, имеющие разную длину сторон или ребер соответственно.

Проведенные расчеты термомодеформационных процессов при ЭНС показали, что порядок крепления узлов при численном моделировании процесса образования сварного соединения влияет на характер и уровень перемещений и напряжений. Поэтому особенности расчетов напряженно-деформированного состояния плит при ЭНС, связанные с малой сопротивляемостью деформированию металла в высокотемпературной зоне, требуют использования следующих двух правил при численном моделировании образования сварного соединения: 1) узлы вдоль кромок свариваемых деталей закрепляются в том положении, в котором они оказались к моменту фиксирования; 2) закрепляются узлы, находящиеся позади источника нагрева, если температура элементов, окружающих данный узел, упала до $1100 \pm 1200^\circ\text{C}$.

Глава 6. Перемещения и напряжения при электрошлаковой сварке относительно узких плит

Проведены расчеты по исследованию влияния размеров свариваемых деталей на характер их деформирования и характер распределения напряжений при ЭНС. При этом толщина свариваемых деталей принималась равной 0,2 м, 0,4 м и 1,6 м, ширина деталей изменялась от 0,4 до 5 м, скорость сварки — от 0,013 см/с до 0,5 см/с, мощность от 57,6 кВт до 460 кВт.

В результате проведенных расчетов установлено:

1. Два различных метода исследования перемещений при ЭНС: метод моделирования аргонно-дуговой сваркой и численный расчетный метод, дали качественно один и тот же результат, заключающийся в том, что в начальные моменты сварки относительно

узких и незакрепленных деталей наблюдается раскрытие сварочного зазора, который достигает наибольшего для данного конкретного случая сварки значения и далее закрывается.

2. При сварке относительно узких деталей возможно установление квазистационарного поля деформаций, а, следовательно, и напряжений, для которых характерна неизменяемость полей деформаций и напряжений и движущихся совместно с источником нагрева координатах. Поле перемещений точек свариваемых деталей в движущихся координатах изменяется с постоянной скоростью. В частном случае скорость изменения поля перемещений в движущихся совместно с источником нагрева координатах может быть равна нулю.

3. При сварке деталей, имеющих значительные размеры по толщине и ширине, возможно развитие превышающих предел текучести металла растягивающих напряжений в корне шва, которые могут достигать 300 МПа при сварке деталей из стали ст.3.

Основные результаты работы

1. В методы решения неизотермических упруго-пластических задач внесены новые элементы:

а) применено вариационное уравнение, выражающее приращение полной энергии системы в случае зависимости свойств металла от температуры и используемое для формирования глобальной матрицы жесткости в методе конечных элементов;

б) разработан метод определения параметров пластичности при решении неизотермических задач в теории течения, основанный на последовательном уточнении коэффициентов, связывающих приращения напряжений и приращения деформаций в линейной форме, и используемый в итерационных процессах при решении задач.

2. Разработаны алгоритмы и программы для расчета термомоформационных процессов при сварке:

а) программы для расчета температурных полей по двумерной и трехмерной схеме при электрошлаковой сварке, использующие метод конечных разностей в качестве численного метода интегрирования дифференциального уравнения теплопроводности и позволяющие учесть зависимость теплофизических свойств металла от температуры;

б) программа для расчета напряженно-деформированного состояния по двумерной схеме плоской деформации или схеме плоского напряженного состояния;

в) программа для расчета напряженно-деформированного состояния по трехмерной схеме.

В алгоритмах и программах для расчета напряженно-деформированного состояния тел используется метод конечных элементов в качестве метода интегрирования дифференциальных уравнений неизо-термической теории течения.

Все программы проверялись путем сопоставления результатов расчетов и экспериментов по определению термических циклов и перемещений при электрошлаковой сварке.

3. Проведено расчетное исследование влияния размеров тела и режимов на перемещения и напряжения в процессе электрошлаковой сварки деталей, имеющих форму прямоугольных параллелепипедов.

4. Проведено исследование влияния размеров и режимов на перемещения деталей при электрошлаковой сварке путем моделирования методом аргоно-дуговой сварки тонких пластин.

5. По результатам выполненной работы разработан "Пакет программ для расчета напряженно-деформированного состояния тел при сварке плавлением, термообработке и других термических воздействиях", который состоит из описания, руководства к применению и текстов программ.

Выводы по работе

1. Эффективным методом исследования напряженно-деформированного состояния деталей в процессе сварки является численный расчетный метод, основанный на неизотермической теории течения с применением метода конечных элементов.

2. Рациональной связью между напряжениями и деформациями в неизотермической теории течения при численном решении задачи следует считать линейную связь в форме "приращение напряжений - приращение деформаций", которая позволяет отказаться от итерационных процессов в случае достаточно малых шагов приращения нагрузки.

В случае значительных шагов приращения нагрузки используемая в настоящее время процедура поэлементного перевода в пластическое состояние является чрезвычайно трудоемкой, поэтому в работе был применен метод, о котором сказано в п. 16 раздела "Основные результаты работы".

3. В отличие от ранее использовавшихся методов, основанных на применении теории упругости, разработанные программы позволяют определить напряжения и деформации, в том числе и объемные, непосредственно в процессе сварки с учетом любых объемных эффектов вследствие структурных превращений, рассчитывать возникающие при сварке перемещения, силы в скобах, "сухарях" и на опорах, учитывать влияние подогревов на указанные процессы. Программы могут быть использованы для расчетов напряжений в телах достаточно сложной формы при любых термических воздействиях.

4. Показано, что при электрошлаковой сварке деталей толщиной до 400 мм предпочтительнее проводить расчеты по схеме плоского напряженного состояния, чем по схеме плоской деформации. Последняя дает особенно большие погрешности в определении напряженного состояния в высокотемпературной зоне по сравнению с расчетами по трехмерной схеме, отражающей возможность появления деформаций в направлении толщины.

5. Исследование влияния ширины свариваемых деталей на их перемещения в условиях, когда запрещен поворот деталей, показало, что весьма широкие детали перемещаются только поступательно в направлении друг к другу, а изгиб от неравномерного нагрева отсутствует. По мере уменьшения ширины возрастает роль изгиба с раскрытием зазора, вызванного неравномерным нагревом по ширине. На некотором расстоянии от начала шва, после достижения максимального раскрытия, наблюдается закрывание зазора, вызванное поступательным сближением деталей и их изгибом.

6. С уменьшением теплоотдачи в воздух и с увеличением скорости сварки, что также соответствует уменьшению теплоотдачи, при одинаковых размерах ширины пластин существенно увеличивается раскрытие зазора в процессе сварки. При этом раскрытие зазора может наблюдаться непрерывно на протяжении всего процесса сварки.

7. Отмеченные в п.п. 5 и 6 особенности перемещения деталей наблюдались как при исследовании перемещений деталей методом моделирования аргонно-дуговой сваркой, так и при исследовании перемещений расчетным методом. Следовательно, установленные особенности перемещения деталей при электрошлаковой сварке действительно имеют место и оба метода применимы в исследовательских целях.

8. При сварке относительно узких деталей возможно формирование квазистационарного поля деформаций, а, следовательно, и напряжений, для которого характерна неизменяемость в движущихся совместно с источником нагрева координатах. При этом поле перемещений точек свариваемых деталей в движущихся координатах может изменяться с постоянной скоростью, но может оставаться и неизменным.

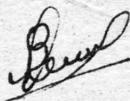
9. При сварке деталей, имеющих значительные размеры по толщине и ширине, возможно развитие очень больших, превышающих предел текучести металла, растягивающих напряжений в корне шва и сжимающих напряжений на некотором расстоянии позади сварочного источника.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Куркин А.С., Мельников В.Л. Особенности вариационного метода решения неизотермических задач теории пластичности. - Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1981, № 8, с. 93-98.

2. Винокуров В.А., Мельников В.Л. Определение перемещений деталей при электрошлаковой сварке путем решения задач по неизотермической теории течения методом конечных элементов. - Автоматическая сварка, 1982, № 7, с. 19-21.

3. Мельников В.Л., Винокуров В.А., Куркин А.С. Численное решение задач о деформациях и напряжениях при сварке пластин. - Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1982, № 7, с. 102-106.



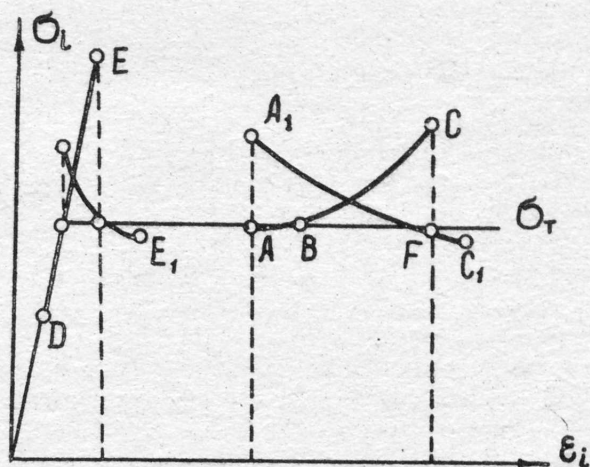


Рис. I. Диаграмма деформирования идеального упруго-пластического тела.

