

М 179525

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
имени Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

И. Г. НЕКРАСОВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ
РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ**

(05.167 «Машины и технология сварочного производства»)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА — 1972

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

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

И.Г.НЕКРАСОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА
СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

(05.167 "Машины и технология сварочного
производства")

Диссертация написана на русском языке

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1179525

Исследоват-
Некрасова И.Г.

Москва

1972

Работа выполнена в МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - д.т.н., проф. Винокуров В.А.

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Ильясевич С.А.

к.т.н., с.в.с. Золотарев В.Б.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета

Автореферат разослан " " _____ 1972 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1972 г.

на заседании Совета _____

МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

Ученый секретарь Совета

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Развитие современной техники привело к широкому применению высокопрочных сталей, конструкции из которых выполняются из листового материала с применением сварки. В процессе изготовления конструкции возможно появление трещиноподобных дефектов, наличие которых может привести к хрупкому разрушению. Эта проблема является предметом исследования механики разрушения, в развитие ее большой вклад внесли отечественные ученые: В.В.Панасюк, М.Я.Леонов, Г.И.Баренблатт, Г.П.Черепанов, Д.Д.Ивлев, В.С.Иванова, Б.А.Дроздовский и др. Предупредить хрупкое разрушение сварных конструкций можно путем выбора материалов либо по сопротивляемости зарождению разрушения (возникновение трещин от уже существующего дефекта), либо по сопротивляемости распространению разрушения (непрерывное удлинение трещины).

Изучение сопротивляемости зарождению разрушения, как это предлагает Макклинтон, может быть выполнено на основе анализа распределений упруго-пластических деформаций у концентратора. Для удобства анализа все факторы, влияющие на сопротивляемость зарождению целесообразно разбить на группу факторов, в результате действия которых может измениться диаграмма деформирования (скорость нагружения, температура окружающей среды, изменения, связанные со сваркой), и на группу факторов, не вызывающих изменения диаграммы (радиус закругления дефекта и его длина). Наиболее простой моделью конструкции с концентратором является пластина с вытянутым эллиптическим отверстием. Первую задачу данной работы можно сформулировать так: исследовать концентрацию упруго-пластических деформаций у дефекта типа эллиптического отверстия в зависимости от параметров диаграммы. Инструментом выполнения этого исследования являются численные методы, которые можно упростить путем использования аппарата теории малых упруго-пластических деформаций.

Процесс распространения разрушения состоит из стадий медленного и быстрого роста трещины. Пути нагружения материала в начальный момент страгивания трещины с места и при установившемся быстром росте являются различными. Этот факт позволяет подвергнуть сомнению существующее в механике разрушения положение, что энергетические затраты при непрерывном продвижении трещины на единицу длины в условиях постоянной нагрузки и энергетические затраты при том же продвижении трещины от неподвижного состояния равны. Проверка этого положения важна в практическом отношении, так как о сопротивляемости металла движению трещины судят по характеристикам, полученным в условиях страгивания трещины с места. Очевид-

но, для осуществления такой проверки необходимо рассмотреть две самостоятельные задачи. При некоторой постоянной нагрузке на бесконечности: а) трещина достигает длины $\bar{a}$, увеличиваясь от весьма малого размера, б) трещина сдвигается с места от начальной длины $\bar{a}$, для чего необходимо найти напряжения и упруго-пластические деформации вблизи вершины неподвижной трещины. Выполнение подобного рода решений требует разработки соответствующего численного метода, что является второй задачей данной работы. При разработке численного метода может быть использован аппарат теории малых упруго-пластических деформаций, который при соответствующем применении вырождается в аппарат теории течения.

Чаще всего распространение разрушения протекает по схеме смешанного напряженного состояния. В этом случае оценку сопротивляемости распространению разрушения можно проводить по энергетическим затратам. При распространении разрушения накопленная в системе энергия переходит в кинетическую энергию движущихся частей конструкции и в энергию $\rho \dot{b}$, идущую непосредственно на распространение разрушения. Последняя подразделяется на энергетические затраты, которые вызывают повышение температуры материала, и на энергетические затраты, которые не вызывают этого изменения. Можно считать, что энергетические затраты, вызывающие повышение температуры, равны $\rho \dot{b}$. Для определения $\rho \dot{b}$ может быть использован метод термоэлектрического импульса. До настоящего времени этот метод не нашел широкого распространения в связи с техническими трудностями при его реализации. Поэтому представлялось целесообразным разработать некоторые методические вопросы определения $\rho \dot{b}$, что является третьей задачей данной работы. Четвертой задачей является сопоставление ряда высокопрочных сталей и сварных соединений по $\rho \dot{b}$ и по некоторым широко распространенным характеристикам сопротивляемости разрушению.

На основании вышеизложенного задачами данной работы являются:

1. Разработка расчетного метода решения статических упруго-пластических задач на ЭЦВМ применительно к концентратору типа эллипса с целью установления влияния параметров диаграммы деформирования на чувствительность материала к концентратору.
2. Разработка расчетного метода решения квазистатических упруго-пластических задач на ЭЦВМ применительно к концентраторам типа трещин, которые неподвижны, сдвигаются с места, движутся, с целью проведения качественной оценки сопротивляемости распространению разрушения (на примере стали СП-28).

3. Разработка методики определения удельной энергии распространения разрушения высокопрочных сталей методом термоэлектрического импульса.

4. Экспериментальное исследование некоторых факторов, влияющих на сопротивляемость разрушению высокопрочных сталей и сварных соединений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов.

Разработка расчетного метода решения статических упруго-пластических задач на ЭЦЕМ применительно к концентратору типа эллипса

Рассматривается пластина с эллиптическим отверстием, к которой на бесконечности приложена равномерно распределенная нагрузка по направлению, совпадающему с меньшей осью эллипса. Эллиптическое отверстие и примыкающая к вершине эллипса область пластины разбивается на кружки, рис.1б. Задачи решаются за несколько приближений методом упругих решений. Предполагается, что деформации равномерно распределены по площади каждого участка. За начальные распределения первого приближения принимаются аналитические упругие напряжения и деформации. На каждом приближении последовательно выполняются следующие пункты.

1. Этап решения пластической задачи. Производится простое нагружение каждого участка зоны пластины от нуля до уровня начальных деформаций $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy})$, подсчитываются напряжения σ' :

$$\sigma'_x = 2G'(\epsilon_x - \epsilon_0) + \epsilon_0 K, \quad \sigma'_y = 2G'(\epsilon_y - \epsilon_0) + \epsilon_0 K, \\ \sigma'_z = 2G'(\epsilon_z - \epsilon_0) + \epsilon_0 K, \quad \tau'_{xy} = G'\gamma_{xy}.$$

Здесь ϵ_0 - средняя деформация; K - объемный модуль упругости; G' - секущий модуль на диаграмме деформирования материала пластины $\tau_{окт} = f(\gamma_{окт})$, где $\tau_{окт}$, $\gamma_{окт}$ - октаэдрические напряжение и деформация. В случае плоского напряженного состояния выполняется условие $\sigma'_z = 0$. В каждом участке зоны пластины начальные напряжения $\sigma(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ заменяются на σ' и на объемные силы $q = \sigma - \sigma' (q_x, q_y, q_{xy})$, которые прикладываются к контуру кружка, рис.1а. 2. Этап решения упругой задачи. Пластина условно считается сплошной и идеально упругой. От действия объемных сил q для каждого участка разбивки подсчитываются дополнительные напряжения $\Delta\sigma$, и деформации $\Delta\epsilon$; при $r > a$:

$$\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y = \frac{-r^2}{1+x^2} [(x-1)\cos 2\psi q_1 - (2\cos 2\psi + A\cos 4\psi)q_2 + (2\sin 2\psi + A\sin 4\psi)q_3],$$

$$\Delta \sigma_{xy} = \frac{\tau^2}{1+\lambda} [(x - y)q_1 - A \sin 4\psi q_2 + A \cos 4\psi q_3],$$

$$\text{при } \Gamma < a: \Delta \sigma_x, \Delta \sigma_y = 2 q_1 (1 + \lambda) x q_2 (1 + \lambda), \quad \Delta \sigma_{xy} = 2 (q_3 - q_1 x).$$

$$\text{Здесь } A = 3(a^2 - \Gamma^2) - 2, \quad q_1 = (q_x + q_y)/2, \quad q_2 = (q_x - q_y)/2, \quad q_3 = q_{xy},$$

Γ – расстояние между центром кружка a и центром данного кружка разбивки; ψ – угол между осью Ox и радиусом-вектором Γ , $\lambda = 3 - 4\nu$ в случае плоскодеформированного и $\lambda = \frac{3-M}{1+M}$ в случае плосконапряженного состояний, $M = 0,3$ – коэффициент Пуассона. При выполнении этапа принимаются возмущающие объемные силы, действующие во всех четырех четвертях декартовой системы координат. 3. Выполнение граничного условия – отсутствие напряжений в участках зоны отверстия. При выполнении второго этапа в зоне отверстия появляются напряжения. С целью их устранения предполагается, что в каждом участке зоны отверстия возникает фиктивная деформация упругого характера и фиктивные напряжения. В общем виде записываются первый ($\sigma_T = 0$) и второй этапы для зоны отверстия. Получается система уравнений $3n_0$ порядка, где n_0 – количество участков в зоне отверстия и где неизвестными являются объемные силы, численно равные фиктивным напряжениям. Правую часть системы образуют напряжения с обратным знаком, которые нужно устранить. В результате решения системы определяются объемные силы, которые после выполнения этапа, аналогичного второму этапу, устраняют напряжения в зоне отверстия, но вызывают появление дополнительных напряжений $\Delta \sigma_2$ и деформаций $\Delta \epsilon_2$ в зоне пластины. 4. Начальные распределения для следующего приближения вычисляются как сумма начальных распределений напряжений и деформаций первого приближения с соответствующими дополнительными распределениями напряжений ($\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2$) и деформаций ($\Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_2$), найденных на данном приближении. Пункты 1–4 последовательно повторяются. Задача считается законченной, когда начальные деформации на соседних приближениях мало отличаются друг от друга. Второе граничное условие – отсутствие заметной пластической деформации в периферийных участках зоны пластины (на рис. 1б они заштрихованы) – проверяется по конечным результатам.

При решении задач диаграммы деформирования задавались участками по степенной зависимости $\epsilon_i = B \epsilon_{pi}^n$, $\epsilon_i = \epsilon_{pi} + \theta_i \cdot E$ и претравлялись в октаэдрические координаты, здесь θ_i , ϵ_i и ϵ_{pi} – интенсивности напряжения, деформации и ее пластической составляющей, n – коэффициент упрочнения материала, E – модуль Юнга.

га, B — коэффициент. Рассматривалось два участка деформирования: первый ($\varepsilon_{pl} \leq 0,002$) описывался Π_1 , второй ($\varepsilon_{pl} > 0,002$) описывался Π_2 .

По разработанному алгоритму решения было выполнено три группы задач при отношении большей оси эллипса к меньшей равном четырем. Для случая плоского деформированного состояния (а) величина внешней нагрузки была выбрана равной $0,388 \sigma_T$, для случая плоского напряженного состояния (б) — $0,278 \sigma_T$, где σ_T — предел текучести материала пластины. Первая группа задач посвящена выявлению влияния коэффициента упрочнения Π_2 на распределение упруго-пластических деформаций. Решения были выполнены для трех диаграмм с $\sigma_T = 150 \text{ кг/мм}^2$, $\Pi_1 = 0,08$ и $\Pi_2 = 0,1; 0,2; 0,3$. Как в случае (а), так и в случае (б) установлено, что с уменьшением Π_2 максимальный уровень деформаций в кружке I несколько увеличивается и увеличивается неравномерность распределения деформаций (отношение деформации в кружке I к деформации в кружке 3, рис.1б). Размер области пластических деформаций практически не зависит от Π_2 . Результаты решения для случая плоского напряженного состояния подчиняются зависимостям Нейбера, Стовелла и Диксона с точностью до 3%. Вторая группа задач посвящена выявлению влияния коэффициента упрочнения Π_1 на распределение упруго-пластических деформаций. Решения были выполнены для двух диаграмм с $\sigma_T = 150 \text{ кг/мм}^2$, $\Pi_2 = 0,1$ и $\Pi_1 = 0,01; 0,08$. Как в случае (а), так и в случае (б) установлено, что с уменьшением Π_1 максимальный уровень деформаций в кружке I и неравномерность распределения деформаций несколько увеличиваются. Размер области пластических деформаций в значительной степени зависит от Π_1 . Третья группа задач посвящена выявлению влияния величины предела текучести на распределение упруго-пластических деформаций. Решения были выполнены только для случая (в) для трех диаграмм с $\Pi_1 = 0,01$, $\Pi_2 = 0,10$ и $\sigma_T = 130, 150, 170 \text{ кг/мм}^2$. Установлено, что коэффициент концентрации пластических деформаций и размер области пластических деформаций практически не зависят от величины предела текучести материала.

Выявленные особенности распределения упруго-пластических деформаций, по-видимому, будут справедливыми в случае более вытянутых эллиптических отверстий, если максимальный уровень начальных упругих напряжений у контура отверстия останется неизменным, что косвенно следует из анализа распределения упругих напряжений у эллиптических отверстий. Можно предположить, что

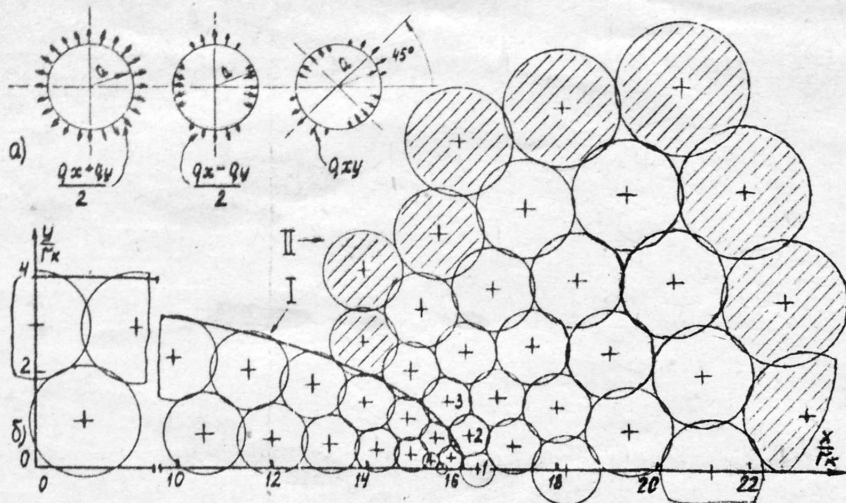


Рис.1. а) Схема действия объемных сил;

б) Разбивка зоны отверстия (I) и зоны пластины (II) на элементы: Γ_k — радиус концентратора.

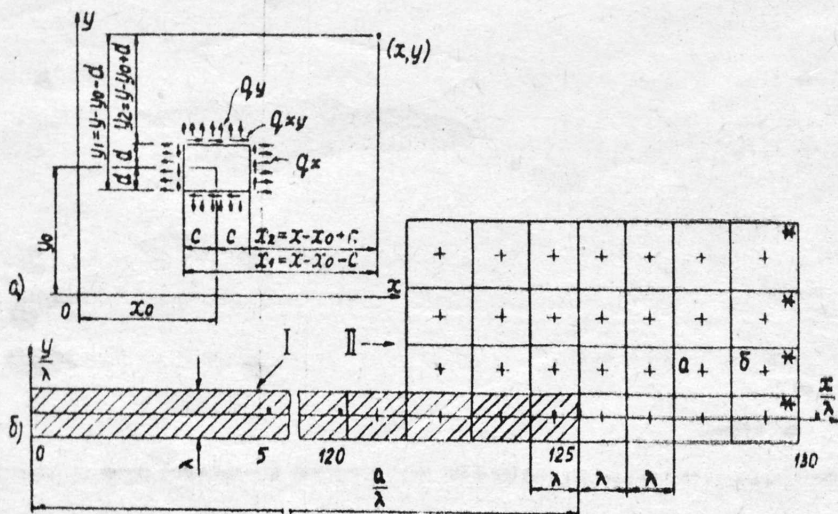


Рис.2. а) Схема действия объемных сил.

б) Разбивка зоны щели (I) и зоны пластины (II) на участки.

формирование областей пластических деформаций, размер которых к моменту появления хрупкого разрушения является характеристикой сопротивляемости материала зарождению разрушения, протекает в соответствии с выявленными особенностями.

Разработка расчетного метода решения квазистатических упруго-пластических задач на ЭЦВМ применительно к концентраторам типа трещин

В бесконечно большой и толстой пластине на прямоугольные участки разбивается некоторая область, рис.26. Ширина полосы зоны щели равна величине λ , которая принимается в качестве единицы длины. К пластине на бесконечности прикладывается равномерно распределенная нагрузка P по направлению OY . Предполагается, что деформации равномерно распределены по площади каждого участка и что внешней нагрузке P по направлению ее действия не сопротивляется материал участков зоны щели ($\sigma_y = 0$). Задачи о неподвижной, стонущейся и движущейся трещинах решаются за несколько приближений методом упругих решений. Для получения начального распределения напряжений и деформаций первого приближения решаются упругие задачи.

Предполагается, что в каждом участке зоны щели возникает фиктивная деформация упругого характера и фиктивные напряжения, при этом размер участков может изменяться только по направлению OY . Для сохранения размеров участков к контуру каждого из них прикладываются объемные силы. Составляется система уравнений $\Pi_{щ}$ порядка, в которой неизвестными являются объемные силы, а правая часть формируется из однородных напряжений $\sigma_y = -P$, здесь $\Pi_{щ}$ — число участков зоны щели. В результате решения системы определяются объемные силы, которые вызывают упругое нагружение материала участков разбивки. Решение задачи для зоны щели протяженностью $2Q:\lambda$ является начальным упругим распределением для задачи о неподвижной трещине. Аналогичное решение для зоны щели протяженностью $2(Q:\lambda+1)$ является начальным упругим распределением для задачи о движущейся трещине. Начальное упругое распределение для случая, когда трещина длиной $2Q:\lambda$ в реальном материале увеличивает свою длину на единицу: $2(Q:\lambda+1)$, находится так. Правая часть системы уравнений $\Pi_{щ}+1$ порядка формируется из напряжений ($-\sigma_y$), полученных в результате решения упруго-пластической задачи о неподвижной трещине длиной $2Q:\lambda$. Получаемые в дальнейшем распределения упругих деформаций и напряжений являются искомыми. На каждом приближении последовательно выполняются

следующие пункты.

1. Этап решения пластической задачи. Случай стронувшейся трещины. В результате решения задачи о неподвижной трещине для материала каждого участка разбивки известны пластические составляющие деформаций и их октаэдрическая деформация χ_{00} , которой соответствует октаэдрическое напряжение τ_0 . Последующее деформирование материала рассматривается как дополнительное. Материал каждого участка подвергается нагружению от уровня деформаций χ_{00} до уровня начальных деформаций $(\Delta \varepsilon_x, \Delta \varepsilon_y, \Delta \varepsilon_z, \Delta \gamma_{xy})$; вычисляются напряжения σ' :

$$\sigma'_x = 2G(\Delta \varepsilon_x - \Delta \varepsilon_0) + \Delta \varepsilon_0 K, \quad \sigma'_z = 2G(\Delta \varepsilon_z - \Delta \varepsilon_0) + \Delta \varepsilon_0 K,$$

$$\sigma'_y = 2G(\Delta \varepsilon_y - \Delta \varepsilon_0) + \Delta \varepsilon_0 K, \quad \tau'_{xy} = G \Delta \gamma_{xy}.$$

Выполнение граничного условия задачи - в участках зоны щели $\sigma'_y = 0$ - достигается путем численного решения следующей системы уравнений путем изменения величин $\Delta \varepsilon_y$:

$$2G(\Delta \varepsilon_y - \Delta \varepsilon_0) + \Delta \varepsilon_0 K = 0, \quad \Delta \varepsilon_0 = (\Delta \varepsilon_x + \Delta \varepsilon_y + \Delta \varepsilon_z) : 3, \quad G = \tau_{окт} : \chi_{окт},$$

$$\Delta \chi_{окт} = 2 : 3 \sqrt{(\Delta \varepsilon_x - \Delta \varepsilon_y)^2 + (\Delta \varepsilon_y - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_z - \Delta \varepsilon_x)^2 + 1,5 \Delta \gamma_{xy}^2},$$

$$\text{при } \Delta \chi_{окт} G > \tau_0 \quad \tau_{окт} = f(\chi_{окт}) \quad \chi_{окт} = \chi_{00} + \Delta \chi_{окт},$$

$$\text{при } \Delta \chi_{окт} G \leq \tau_0 \quad \tau_{окт} = \Delta \chi_{окт} G,$$

здесь G - упругий модуль сдвига материала. В каждом участке начальные напряжения σ ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) заменяются на σ' и на объемные силы $q = \sigma - \sigma'$ (q_x, q_y, q_{xy}), которые прикладываются к контуру прямоугольных участков. (В случае неподвижной трещины $\chi_{00} = \tau_0 = 0$). В случае движения трещины нагружение материала каждого участка ряда, вытянутого вдоль направления движения трещины, производится от уровня пластических деформаций, имеющегося в соседнем участке этого ряда, который расположен ближе к переднему фронту разбивки. Материал участков переднего фронта (на рис.2б) они отмечены звездочками) нагружается от нуля. Например, материал участка А, рис.2б, подвергается нагружению от уровня пластических деформаций ε'_p , известного для участка Б, до уровня полных деформаций ε , известного для участка А, т.е. на величину дополнительных деформаций

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon'_p: \quad \Delta \varepsilon_x = \varepsilon_x - \varepsilon'_{px}, \quad \Delta \varepsilon_y = \varepsilon_y - \varepsilon'_{py}, \quad \Delta \varepsilon_z = \varepsilon_z - \varepsilon'_{pz}, \quad \Delta \gamma_{xy} = \gamma_{xy} - \gamma'_{p,xy}.$$

Последующие операции: вычисление напряжений σ^i , выполнение граничного условия, вычисление объемных сил, производятся так же, как в случае стронувшейся трещины. 2. Этап решения упругой задачи. Пластина считается сплошной и идеально упругой. Для каждого участка подсчитываются дополнительные напряжения $\Delta\sigma$ и деформации $\Delta\epsilon$, от действия объемных сил Q , рис.2а, приложенных к контуру каждого участка разбивки, с учетом их действия во всех четырех четвертях:

$$\Delta\sigma_x = \{P_x(1+x) + P_y(3-x)\}q_1 + \{P_x(1-x) - P_y(3-x) - 4P_2\}q_2 + 4(P_4 - P_3)q_3 \cdot [4\pi(1+x)],$$

$$\Delta\sigma_y = \{P_x(3-x) + P_y(1+x)\}q_1 + \{P_x(3-x) - P_y(1+x) - 4P_2\}q_2 + 4(P_4 + P_3)q_3 \cdot [4\pi(1+x)],$$

$$\Delta\tau_{xy} = \{2P_x(x-1)q_1 - 4P_3q_2 + [(x-1)(P_x + P_y) - 4P_2]q_3\} \cdot [4\pi(1+x)],$$

$$\text{здесь } P_x = 2[\arctg(y_1/x_1) - \arctg(y_2/x_1) - \arctg(y_1/x_2) + \arctg(y_2/x_2)],$$

$$P_y = 2[\arctg(x_1/y_1) - \arctg(x_2/y_1) - \arctg(x_1/y_2) + \arctg(x_2/y_2)],$$

$$P_2 = \left(\frac{x_1 y_1}{x_1^2 + y_1^2} - \frac{x_1 y_2}{x_1^2 + y_2^2} - \frac{x_2 y_1}{x_2^2 + y_1^2} + \frac{x_2 y_2}{x_2^2 + y_2^2} \right) \cdot 2,$$

$$P_3 = \frac{x_1^2 - y_1^2}{x_1^2 + y_1^2} - \frac{x_1^2 - y_2^2}{x_1^2 + y_2^2} - \frac{x_2^2 - y_1^2}{x_2^2 + y_1^2} + \frac{x_2^2 - y_2^2}{x_2^2 + y_2^2},$$

$$P_4 = \ln \frac{(x_1^2 + y_1^2)(x_2^2 + y_2^2)}{(x_1^2 + y_2^2)(x_2^2 + y_1^2)}.$$

3. Начальные распределения для следующего приближения вычисляются аналогично тому, как это изложено в первой главе. Условие окончания решения задач формулируется так, как в случае решения задач первой главы.

По разработанному алгоритму решения упруго-пластических задач были решены задачи о неподвижной, стронувшейся с места и движущейся трещинах. В качестве материала пластины была выбрана сталь СП-28 в закаленном и отпущенном состоянии. Параметры диаграммы деформирования определялись по результатам испытания на выпучивание и использовались для выражения диаграммы в октаэдрических координатах: $\sigma_T = 133,5 \text{ кг/мм}^2$, $\eta_1 = 0,12$; $B_1 = 281,5$;

$\eta_2 = 0,05$; $B_2 = 210$. По результатам решения задач о стронувшейся и движущейся трещинах вычислялась удельная энергия, затраченная на пластическое деформирование единицы объема материала каждого участка разбивки: $w_i = 1,5 \int_{\gamma_{00}}^{\gamma_{\text{рокм}}} \sigma_{\text{окт}} d\Delta\gamma_{\text{рокм}}$, здесь $\Delta\gamma_{\text{рокм}}$ -

пластическая составляющая дополнительной октаэдрической деформации $\Delta \chi_{\text{окт}}$. Суммарные энергетические затраты на пластическое деформирование при продвижении трещины на единицу длины λ под- считывались как $W = (\sum F_i W_i) : \lambda$, здесь Π - число участков разбивки, F_i - площадь участка разбивки, находящегося в первой четверти: $W_{\text{стр}} = (1,6 \cdot 10^4 \lambda 4 \delta_T^2) : 9 \cdot G$, $W_{\text{дб}} = (1,6 4 \cdot 10^4 \lambda 4 \delta_T^2) : 9 \cdot G$.

Сравнение энергетических затрат в случае стронувшейся трещины $W_{\text{стри}}$ в случае движущейся трещины $W_{\text{дб}}$ свидетельствует, что, несмотря на различные пути нагружения, в обоих случаях при продвижении трещины на единицу длины на пластическое деформирование материала затрачивается одинаковое количество энергии, если разрушение протекает по схеме плоской деформации. В этом случае о сопротивляемости металла движению трещины можно судить по такой характеристике, как критерий Ирвина, получаемой в условиях стра- гивания трещины в места.

Разработка методики определения удельной энергии распро- странения разрушения в высокопрочных сталях методом тер- моэлектрического импульса

Для определения удельной энергии распространения разрушения R_5 термоэлектрическим методом испытывают на растяжение образцы толщиной равной толщине листового материала δ . К образцу при- варивают два константановых электрода, свободные концы которых подключают к гальванометру магнитоэлектрической системы. Один электрод, горячий спай, располагают в точке A , отстоящей от средней линии излома на расстояние равное большему из двух зна- чений $X_A = 5\delta$, $X_A = 0,7\delta$, где δ - величина сколов кромок излома образца. Второй электрод, холодный спай, располагают в точке B на расстоянии от горячего спаия не меньшем, чем $X_A - X_B = 2 X_A$. При разрушении образца регистрируют максимальное отклоне- ние указателя гальванометра Π_{max} . Вычисление R_5 производит- ся в предположении, что при разрушении по плоскости излома дейст- вует мгновенный плоский источник теплоты R_5 . Предлагаемая даль- нейшая обработка экспериментальных результатов, в отличие от ра- нее существовавшей, предложенной автором термоэлектрического ме- тода А.А.Уэллсом, позволяет избежать ошибки, связанной с инерци- онностью гальванометра. Расчетным путем находится максимальное отклонение указателя гальванометра Π_{max} в предположении, что удельная энергия распространения разрушения равна единице работы. Для этого используется дифференциальное уравнение движения рамки гальванометра

$$\frac{d^2 n_1}{dt^2} + 2\beta \frac{dn_1}{dt} + n_1 = m f(T), \quad (I)$$

здесь $\tau = t/T_0 \cdot (2\pi)$, t - время; T_0 , β - период собственных колебаний и коэффициент затухания гальванометра; m - число делений шкалы гальванометра в статическом режиме, соответствующее 1°C ; $f(T) = f_1(T) \cdot f_2(T)$ - функция изменения температуры в т. А от действия мгновенного плоского источника теплоты $f_1 = \frac{\rho_\delta \exp[-T_0^2(4\alpha t)]}{c\gamma \sqrt{4\pi\alpha t}}$ с учетом выравнивания ее по ширине образца $f_2(T)$; $c\gamma$, α - удельная теплосмкость и коэффициент температуропроводности ис - следуемой стали. При $\beta > 1$ ($\Gamma_1 = -\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}$, $\Gamma_2 = -\beta - \sqrt{\beta^2 - 1}$) решение уравнения (I) имеет вид:

$$n_1 = m \cdot (\Gamma_2 - \Gamma_1) \cdot e^{-(\Gamma_2 - \Gamma_1)\tau} \int_0^\tau e^{(\Gamma_2 - \Gamma_1)\tau} \cdot f(T) d\tau.$$

Величина $n_{1\text{max}}$ является максимальным значением ординаты кривой n_1 и находится численным методом. Пропорциональность величины отклонения указателя гальванометра величине ρ_δ позволяет ρ_δ вычислять как $\rho_\delta = n_{\text{max}} : n_{1\text{max}}$. Изложенная обработка экспериментальных результатов была опробирована. В образце с помощью трения по линии действия предполагаемого реального источника теплоты было образовано некоторое количество тепла. Отклонение указателя гальванометра (n) фиксировалось с помощью кинокамеры; строилась зависимость $n = f(t)$, которая соответствовала аналогичной зависимости, полученной при численном решении уравнения (I).

Экспериментальное исследование некоторых факторов, влияющих на сопротивляемость разрушению высокопрочных сталей и сварных соединений

Для сравнительной оценки листовых высокопрочных сталей представляет интерес определить характеристики сопротивляемости разрушению на различных стадиях разрушения. При испытании образцов одинаковой геометрии сравнительной характеристикой сопротивляемости зарождению разрушения может служить кажущееся значение критерия Ирвина K_q . Характеристикой сопротивляемости разрушению на стадии медленного роста трещины было принято перемещение надреза у его устья (СОД) в момент достижения внешней нагрузкой максимального значения, поскольку стадии медленного роста присуще повышение нагрузки. Для определения характеристики сопротивляемости распространению разрушения ρ_δ геометрия образцов, рекомендованная практикой критерия Ирвина, была выбрана из условия ми -

нимального влияния краевых эффектов при разрушении на ρ_b : отношение протяженности излома к толщине образца должно быть не менее четырех. В дополнение сопротивляемость разрушению оценивалась по отношению среднего максимального напряжения к пределу текучести $\sigma_{разр} : \sigma_T$.

Первая группа экспериментов была выполнена на образцах растяжения (2x24 мм) с односторонним боковым надрезом из стали СП-28 в закаленном и отпущенном состоянии. Установлено, что эта сталь имеет более высокую сопротивляемость разрушению в продольном направлении проката, чем в поперечном, а также в случае закалки на воздухе, чем в среде аргона. Вторая группа экспериментов была выполнена на образцах растяжения: (2,5x20 мм) с центральной про-резью из стали ЭИ643, (12 x 12 мм) с односторонним боковым надрезом из стали 30ХГСНА. Стали предварительно были подвергнуты пластическому деформированию ($\leq 2\%$) и последующему старению. Установлено, что с увеличением степени пластического деформирования сопротивляемость разрушению падает. Третья группа экспериментов была выполнена на образцах растяжения (3x34 мм) с односторонним боковым надрезом из ряда высокопрочных среднедегированных сталей. Испытывался основной металл и металл сварного шва, полученный переплавом основного металла на режиме: ток 160+175 а, скорость сварки 12 м/час. На сварных образцах надрез наносился по продольной оси шва. В дополнение были проведены испытания на растяжение образцов 3x10 мм с целью снятия диаграммы деформирования, а также испытания на ударный изгиб по Б.А.Дроздовскому. Результаты экспериментов показали, что для первой группы сталей: ВКС-1, КВК-42, КВК-37, ЭИ643, 30ХГСНА, ВЛ-1Д, условный размер области пластических деформаций $(K_d / \sigma_T)^2$ уменьшается с уменьшением коэффициента упрочнения n , имеющим место при малых пластических деформациях на диаграмме деформирования, что соответствует установленной в первой главе особенности формирования области пластических деформаций. Для второй группы сталей: ВКС-3, КВК-26, 30ХГСА, эта особенность не подтвердилась. В сталях первой группы как для основного металла, так и для металла шва с увеличением предела текучести наблюдается понижение характеристик K_d , $\sigma_{0.2}$, ρ_b , $\sigma_{T\gamma}$, $\sigma_{разр} : \sigma_T$ до некоторого не равного нулю предела. Однотипность этого снижения свидетельствует, что как на стадии зарождения разрушения, так и на стадиях медленного и быстрого роста формирования области пластических деформаций подчиняется одним и тем же закономерностям. Для основного металла подтверди-

дось соотношение $\alpha_{\tau\gamma} > \rho_{\delta}$; для основного металла и металла шва наблюдается увеличение ρ_{δ} с ростом $b_{\text{разр}}:b_{\tau}$. С помощью статистических методов обработки экспериментальных результатов было подсчитано ослабление сварного соединения ($Q_{\delta} < 1$), которое следует учитывать при расчете конструкций из исследованных высокопрочных сталей толщиной 3 мм.

Общие выводы

1. Разработан численный расчетный метод для определения упруго-пластических деформаций у эллиптического отверстия в растянутой пластине.

2. Полученные этим методом, для случая плоского напряженного состояния, величины напряжений и деформаций за пределами упругости вблизи эллиптического отверстия в пластине из высокопрочных сталей подчиняются зависимостям Нейбера., Стовелла и Диксона с точностью до 3%.

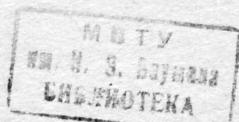
3. С помощью разработанного метода для случая плосконапряженного и плоскодеформированного состояний показано, что с уменьшением коэффициента упрочнения материала пластины вблизи эллиптического отверстия возрастают максимальные деформации и неравномерность их распределения, что должно приводить к понижению сопротивляемости зарождению разрушения.

4. Разработана модель трещины в пластине, предназначенная для численного расчетного определения упруго-пластических деформаций в устье неподвижной, страгивающейся в движущейся трещин.

5. На основе разработанной модели путем решения соответствующих задач показано, что если разрушение металла протекает по схеме плоской деформации, то сопротивляемость металла разрушению при продвижении в нем трещины можно оценивать по критерию Ирвина.

6. Разработана методика обработки результатов, получаемых по термоэлектрическому методу при использовании в качестве измерительного механизма гальванометра магнитоэлектрической системы: удельная энергия распространения разрушения определяется отношением максимальных отклонений указателя гальванометра зарегистрированного при эксперименте и расчетного, вычисленного в предположении, что удельная энергия распространения разрушения равна единице работы, что позволяет избежать ошибки, связанной с инерционностью гальванометра.

7. Экспериментально путем определения удельной энергии разрушения, критерия Ирвина, критерия раскрытия берегов трещины и среднего разрушающего напряжения показано:



- При распространении разрушения в поперечном направлении проката в стали СП-28 толщиной 2 мм расходуется примерно на 70% энергии больше, чем при распространении разрушения вдоль проката.

- С увеличением степени предварительного деформирования в сталях ЭИ643 толщиной 2,5 мм и 30ХГСНА толщиной 12 мм происходит понижение сопротивляемости материала разрушению.

- Изменения, связанные со сваркой, в ряде среднелегированных сталей в большинстве случаев приводят к понижению, а в некоторых случаях и к повышению сопротивляемости разрушению.

- В среднелегированных высокопрочных сталях размер области пластических деформаций, предшествующих разрушению, тем больше чем больше коэффициент упрочнения материала η . Это относится к сталям, у которых начальный участок пластических деформаций, описываемый η , на диаграмме деформирования, является довольно протяженным. В этих сталях отмеченной закономерности подчиняется формирование области пластических деформаций также на стадии медленного и быстрого роста трещины.

8. Разработано "Руководство по определению работы разрушения высокопрочных сталей методом температурного импульса", которое может быть использовано в лабораторной практике при испытании высокопрочных сталей.

Содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Винокуров В.А., Гарбузова И.Г. Регистрация температурного импульса при разрушении металла с помощью гальванометра. "Известия высших учебных заведений. Машиностроение", 1971, № 9.
2. Винокуров В.А., Гарбузова И.Г. Исследование особенностей концентрации напряжений вблизи эллиптического отверстия. "Известия высших учебных заведений. Машиностроение". 1972, № 3.

Л-89441 23/VI-74. Зак 1635 тип 150

Типография с.-х. академии им. К. А. Тимирязева
Москва 125008, Тимирязевская ул., д. 44