

4178247

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерства высшего и среднего специального образования СССР

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

В. К. ЧЕРКАСОВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА
И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

(Специальность 05.167—Машины и технология сварочного
производства)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана и Иркутском политехническом институте.

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор В. А. Винокуров.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, А. В. Петров,
кандидат технических наук, ст. н. с. А. С. Рахманов.

Ведущее предприятие — Иркутский завод тяжелого машиностроения имени В. В. Куйбышева.

Автореферат разослан « » 1972 г.

Защита 1972 г.
на заседании машинам и
технологического го высшего
технического техникума

С д библиотеке Училища.

Отз заверенный
печать ва, 107005,
2-я Бауманская

Ученый Винокуров
доктор технических наук

M178247



1178247

Черкасов В.К. Разработка

-1-

в хозяйстве наряду с другими направлениями идёт по линии освоения новых, в частности, северных районов Советского Союза, в которых одним из определяющих факторов эксплуатации машин и сооружений является низкая температура. Поэтому возрастают потребности в специальной северной технике, в материалах, не склонных к хрупким разрушениям из-за понижения температуры.

Поскольку для хрупкого разрушения характерно внезапное быстрое распространение трещин, то сопротивляемость распространению трещин становится одной из важнейших характеристик металла. В связи с этим остаётся актуальной задача развития методов оценки сопротивляемости металла разрушению при движении в нём трещины.

Для сварных металлоконструкций в силу их монолитности и напряжённости проблемы сопротивляемости распространению трещин является особенно острой и развитие упомянутых методов применительно к сварным конструкциям также является актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена разработке метода определения удельной работы разрушения металла и сварных соединений как характеристик сопротивляемости распространению трещин.

Работа состоит из 4-х глав.

Глава I "Сопротивляемость металла и сварных соединений распространению трещин и постановка задачи исследования".

Эксплуатационные свойства сварной металлоконструкции зависят в значительной мере от свойств сварного соединения. В последнем металл существенно отличается от основного по строению; его способность к пластической деформации частично исчерпана ещё в процессе изготовления конструкции – при сварке; здесь нередко возникают и разгоняются трещины, чему способствует значительный запас энергии остаточных напряжений в конструкции.

В развитии представлений о механизме разрушения металла в том числе и металла сварных соединений использовались различные подходы: прочностной (Давиденков Н.Н., Ужик Г.В.), деформационный (Ньюхаус Д.И., Уэллс А.А. и Бурдекин Ф.М.). Обширную группу методов исследования сопротивляемости металла разрушению объединяет энергетический подход.

Энергетические понятия в теорию разрушения были введены в 1921г. Гриффитсом А.А. в виде соотношения между энергией деформации и поверхностной энергией, при котором возможен рост трещины. Им, в частности, введено понятие о критическом размере трещины, по достижении которого начинается её самопроизвольное распространение. Позд-

шарошки 14178247 М178247

нее Ирвин Дж.Р. и Орован Е. с сотрудниками показали, что применительно к металлам необходимо учитывать энергию, затрачиваемую на пластическую деформацию вблизи поверхности разрушений.

По современным представлениям процесс разрушения металла проходит две стадии: возникновение трещины и её распространение. Распространение трещины происходит вследствие того, что количество освобождающейся по мере продвижения трещины энергии превосходит её расход на пластическую деформацию и перемещение частиц металла (имеется в виду нестабильный рост трещины).

Долгое время использовались главным образом критерии суммарных затрат энергии на разрушение образца. В частности, получили распространение методы определения так называемой ударной вязкости (Меннаже, Изод, Шарпи, Шнайт). При использовании этих методов фиксируются суммарные затраты энергии на изгиб образца, зарождение трещины, продвижение трещины, ускорение обломков и т.п., в которых работа распространения трещины составляет небольшую долю.

Предпринимались попытки разделить работу разрушения на составляющие: работу зарождения трещины и работу её распространения. Отметим некоторые из существующих методов:

- а) методы с осциллографированием различных характеристик, — ускорения (Одинг И.А. и Шихобалов С.П., Гайченко М.Н.), усилия (Бакши О.А.), напряжений (Волошенко-Климовицкий Ю.Я.), — и вычисления по осциллограммам величины работы распространения трещины;
- б) методы испытаний надрезанных образцов или образцов с усталостной трещиной (Дроздовский Б.А. и Фридман Я.Б., Кан и Имбембо) с записью диаграммы "нагрузка — прогиб", по которой планиметрированием можно получить величину работы на различных стадиях разрушения;
- в) методы разделения ударной вязкости на составляющие путём экстраполяции к нулевому радиусу надреза на образце (Гуляев А.П., Иванова В.С.), путём разрушения предварительно "надорванного" образца с измерением угла изгиба (Лившиц Л.С. и Рахманов А.С.) или глубины трещины (Отани), путём определения доли волокнистого излома (Ньюхаус Д.И.), путём сравнительных испытаний разношироких образцов с трещиной (Хартбауэр и Орнер) и др.

В последние годы интенсивно развиваются методы так называемой механики разрушения, основанной на идеях Гриффитса А.А. с дополнениями Ирвина Дж.Р., Орована Е. и др. Предложены два критерия свойств металла, содержащего трещину: интенсивность повышения напряжений в острие трещины "K" и вязкость разрушения "C".

Перечисленные методы более точно, чем ударная вязкость, характе-

ризуют свойства металла, однако им присущи некоторые недостатки. Либо в измерительной цепи присутствует элемент (тензо- или пьезодатчик), свойства которого связаны с процессом нагружения отчасти неизвестной зависимостью; либо в расчёт принимаются не все энергетические затраты; либо используются допущения, выполнение которых в реальных и даже в лабораторных условиях не бесспорно; либо на результаты испытаний и вычислений сильно влияет конструкция образца. Все отмеченные методы включают в работу распространения трещины и работу трогания трещины с места.

В динамических же условиях, при непрерывно растущей трещине, важными являются две характеристики металла: удельная работа разрушения в условиях плоской деформации (обозначим её "р") и удельная работа разрушения металла при его конкретной толщине и при наличии утяжки кромок трещины (обозначим её "р_δ"), которые необходимо измерять при движении трещины.

Энергетическую характеристику процесса разрушения в развитии позволяет измерять предложенный Уэллсом А.А. метод тепловой волны с использованием теплового эффекта пластической деформации слоёв металла, прилегающих к поверхности разрушения.

Есть ряд методов-проб, позволяющих оценивать условия распространения разрушения без выражения в каких-либо энергетических показателях. Для динамических условий часто используется проба Робертсона и её разновидности (Дуда Р.И., Каназава), дающие зависимости между напряжениями и температурой, при которой возбуждённая трещина останавливается. Такую же зависимость по несколько иной методике получали Северницкий В.В. и Жемчужников Г.В.

Сопоставление существующих методов показывает, что наиболее свободным от побочных влияний является метод тепловой волны; только он позволяет исследовать свойства металла при движении в нём трещины с получением количественных результатов, поэтому его необходимо развивать. Технически он реализован следующим образом.

На плоском образце надрезали узкие грани. По одну сторону от будущей трещины на мягком припое крепили два спая естественной термопары "материал образца - никельмедная проволока"; один спай располагали на расстоянии $x_1=2,5$ мм от линии надрезов, другой - на расстоянии $x_2=25$ мм; концы проволок присоединяли к гальванометру. В момент разрыва образца поверхности разрушения становились источниками тепла из-за пластической деформации металла около поверхности разрушения. Ближний к трещине спай нагревался, а дальний практически оставался холодным, пока не заканчивали отсчёт показаний

гальванометра. По известным формулам для мгновенного плоского источника тепла вычисляли удельную работу из условия, что не менее 0,9 энергии пластической деформации преобразуется в тепло.

В известной по литературе реализации метода Уэллса А.А. есть ряд неясностей методического порядка. Во-первых, нет чётких указаний на смысл измерявшейся величины. Судя по описаниям экспериментов, Уэллсом измерялась скорее p_k , чем p , так как не учитывалось влияние утяжки и пластической деформации на стадии зарождения трещины. Полученная характеристика использовалась в формулах Ирвина, которые трактуют состояние металла с трещиной статически. Во-вторых, нет обоснования расстояния x_1 термопары до трещины и нет учёта влияния побочных деформаций на температуру образца. В условиях опыта вероятнее была регистрация теплового эффекта от утяжки, чем от поверхности разрушения. В-третьих, не учитывалась фактическая распределённость пластической деформации металла в некотором объёме. В-четвёртых, остался открытым вопрос об испытаниях при отрицательных температурах и при ударном приложении нагрузки. В-пятых, неудачен способ крепления термонары к образцу (на мягком припое).

Для успешного применения при изучении сопротивляемости металла распространению трещин по удельной работе разрушения метод тепловой волны нуждается в дальнейшей разработке. На основании анализа метода Уэллса А.А. были сформулированы задачи настоящего исследования:

- а) выяснение практической возможности использования теплового эффекта разрушения металла для определения удельной работы разрушения,
- б) определение условий достаточно точного измерения теплового эффекта плоской пластической деформации, сопровождающей движение трещины,
- в) выбор и разработка методики применения регистрирующей аппаратуры,
- г) разработка конструкции образца и техники его подготовки,
- д) разработка методики низкотемпературных испытаний.

Глава II "Разработка термоэлектрического метода определения удельной работы разрушения металла". При разрушении металла, вязком или хрупком, наблюдается пластическая деформация некоторого слоя металла около поверхности разрушения (Орлов Е., Касаткин Б.С., Карета Н.Л.) толщиной в пределах 0,03-3,0 мм. Пластическая деформация сопровождается упругой, которая частично в виде искажений кристаллической решётки остаётся необратимой. Вдали от поверхности разру-

шения происходит обратимая упругая деформация. Работа, необходимая для образования необратимых изменений металла по обе стороны от распространяющейся трещины, есть работа разрушения металла. В случае отсутствия структурных превращений и химических реакций она может быть представлена в виде суммы: $A_{pc} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$. Здесь A_1 — работа, затраченная на пластическую деформацию металла около поверхности разрушения; A_2 — работа, затраченная на пластическую деформацию утяжки металла по краям трещины; A_3 — работа, затраченная на создание остаточных упругих напряжений в кристаллической решётке (так называемая поглощённая энергия); A_4 — суммарная поверхностная энергия трещины.

Формы поверхностей разрушения связаны с условиями деформации металла. Когда соблюдаются условия плоской деформации, на поверхности разрушения есть участок, нормальный к направлению разрушающей силы, и утяжка распространяется не на всю толщину металла. В тонком металле утяжка может охватить всю толщину. С этих позиций компонента A_1 — работа, затраченная на плоскую пластическую деформацию металла около поверхности разрушения; A_2 — работа, затраченная на пластическую деформацию утяжки. Компоненты $A_{1,3,4}$ в удельной форме, то есть отнесённые к единице поверхности, обозначим r_1 , r_3 и r_4 с размерностью кгм/см^2 или дж/см^2 ; условно, поскольку утяжка может охватывать не всю поверхность разрушения, через удельную величину r_2 обозначим и компоненту A_2 . По ранее принятому определению (стр.3): $r = r_1 + r_3 + r_4$, $r_8 = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$. Очевидно, что всегда $r_8 > r$. При увеличении толщины металла, скорости движения трещины и при понижении температуры r_8 уменьшается и приближается к r .

Известные исследования (Кузнецов В.Д., Большанина М.А., Ирвин Д.Р., Черепанов Г.П.) показывают, что r_3 составляет около 10% от работы пластической деформации, а удельная поверхностная энергия r_4 — около 0,1% от так называемой эффективной поверхностной энергии ($r_1 + r_4$); поэтому с ошибкой около 10% можно считать $r = r_1$, а $r_8 = r_1 + r_2$. В виде тепла проявляются только r_1 и r_2 , поэтому по тепловому эффекту разрушения можно судить либо о величине r , либо — r_8 (в зависимости от характера разрушения).

Поскольку пластическая деформация затрагивает всю поверхность разрушения и может быть неравномерной, то объём пластически деформированного металла является источником тепла, занимающим всю поверхность разрушения, имеющим некоторое распределение в глубину и по поверхности и действующим некоторое время. Длительность процес-

са разрушения при нестабильном распространении трещины в образце ограниченных размеров настолько мала, что названный источник тепла практически является мгновенным. Специальный анализ показал, что замена мгновенного источника с распределением, соответствующим распределению пластической деформации, на плоский мгновенный источник вносит пренебрежимо малую ошибку. Таким образом, можно воспользоваться уравнением линейного процесса распространения тепла от мгновенного плоского источника тепла (по Рыкалину Н.Н.):

$$T(x,t) = \frac{Q}{F \cdot c \gamma \sqrt{4\pi a t}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{4at} - bt\right] \quad (1)$$

Произведя некоторые преобразования, имея в виду, что при действующих малых температурах коэффициент температуротдачи в = 0 и вводя в качестве координаты по времени момент наступления максимальной температуры, получим:

$$Q_2 = T_m \cdot x \cdot c \gamma \sqrt{2\pi e} \quad (2)$$

По определению удельной работы разрушения $Q_2 = p$, поэтому:

$$p = 4,13 \cdot T_m \cdot x \cdot c \gamma \quad (3)$$

Следовательно, определение удельной работы разрушения металла при известных его теплофизических характеристиках и известном расстоянии точки фиксирования температуры до поверхности разрушения сводится к измерению максимальной температуры в этой точке.

Для случая разрушения образца из стали Ст.3 сечением 1 см² на расстоянии 0,5 см от поверхности разрушения максимальная температура будет порядка 0,1-0,2 °С. При снижении температуры испытания можно ожидать снижения измеряемой температуры до сотых долей градуса. Из известных способов регистрации температуры в данном случае приемлемым является термоэлектрический с применением естественной дифференциальной термопары (ЕТП). В качестве второго компонента ЕТП (первым является материал образца) выбрали константан, дающий в сочетании с железоуглеродистыми сплавами достаточно большую термо-ЭДС (около 50 мкВ/°С) и сохраняющий её постоянной в большом диапазоне температур. Поскольку фактическая температурная характеристика ЕТП зависит от химического состава её компонентов, то проводили тарировку ЕТП при каждой смене исследуемого материала.

По расчёту постоянная прибора, соединяемого к термопаре, должна быть не более 0,5 мкВ/деление.

При выборе величины x_1 необходимо выполнять два условия: а) тепловой фронт в сечении образца с "горячим" спаем ЕТП должен быть близким к плоскому и б) измеряемая в этой точке температура должна быть надёжно зарегистрирована. Специальный анализ позволил определить наименьшие допустимые величины x_1 , при которых выполня-

ется схема мгновенного плоского источника тепла. Для характерных случаев разрушения металла - хрупкого при наличии глубоких острых надрезов на образце, хрупкого или вязкого без надрезов на образце, хрупкого или вязкого с выраженной шероховатостью поверхности разрушения и полухрупкого - были сформулированы 4 задачи, решения которых давали такие расстояния x_I , на которых неравномерность распределения температуры по сечению образца не превышает 5%. При формулировании условий задач объёмы пластически деформированного металла схематизировались в виде различных источников тепла.

Задача 1. В неограниченной пластине толщиной δ мгновенно выделяется плоский источник тепла шириной $2l \leq \delta$; плоскость источника перпендикулярна поверхности пластины; источник расположен симметрично по толщине пластины.

Задача 2. На противоположных гранях бесконечного прямоугольного стержня шириной δ и толщиной l мгновенно выделяются два одинаковых линейных источника тепла; источники расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси стержня.

Задача 3. В неограниченном теле на волнистой поверхности, форма которой задаётся законом $x = x_0 \cdot \cos(\pi y/l)$, мгновенно выделяется равномерно распределённый источник тепла.

Задача 4. В неограниченном теле мгновенно выделяется плоский источник тепла с неравномерным распределением по закону $q = q_0 [1 + \cos(\pi y/l)]$.

Были найдены выражения для минимальной и максимальной температур в сечении образца с "горячим" спаем ЕТП:

задача 1

$$T_{\min} = T_0 \left\{ \left[\varphi\left(\frac{q_0 \delta + l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{15\delta + l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{25\delta + l}{\sqrt{4at}}\right) + 0,5 \varphi\left(\frac{35\delta + l}{\sqrt{4at}}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\varphi\left(\frac{q_0 \delta - l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{15\delta - l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{25\delta - l}{\sqrt{4at}}\right) + 0,5 \varphi\left(\frac{35\delta - l}{\sqrt{4at}}\right) \right] \right\}; \quad (5)$$

$$T_{\max} = T_0 \left\{ \left[\varphi\left(\frac{l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{\delta + l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{2\delta + l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{3\delta + l}{\sqrt{4at}}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\varphi\left(\frac{\delta - l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{2\delta - l}{\sqrt{4at}}\right) + \varphi\left(\frac{3\delta - l}{\sqrt{4at}}\right) \right] \right\} \quad (6)$$

задача 2

$$T_{\min} = e^{-\frac{\delta^2}{8x^2}} + e^{-\frac{9\delta^2}{8x^2}} + e^{-\frac{25\delta^2}{8x^2}} + 0,5 e^{-\frac{49\delta^2}{8x^2}}; \quad (7)$$

$$T_{\max} = 0,5 + e^{-\frac{4\delta^2}{8x^2}} + e^{-\frac{16\delta^2}{8x^2}} + e^{-\frac{36\delta^2}{8x^2}} \quad (8)$$

$$T_{\min} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\cos^2(\pi y/\ell) + 2x \cos(\pi y/\ell) + y^2}{2(x-1)^2}} dy'; \quad T_{\max} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\cos^2(\pi y/\ell) - 2x \cos(\pi y/\ell) + y^2}{2(x-1)^2}} dy'. \quad (9, 10)$$

ℓ — полу период косинусоиды.

задача 4

$$T_{\min} = 1 - e^{-\left(\frac{\pi \cdot x}{\ell \sqrt{2}}\right)^2}; \quad T_{\max} = 1 + e^{-\left(\frac{\pi \cdot x}{\ell \sqrt{2}}\right)^2}. \quad (11, 12)$$

ℓ — полу период косинусоиды.

Результаты решения задач получены также в виде кривых (задачи 2 и 4) и семейств кривых (задачи 1 и 3), по которым, задаваясь параметрами образца и поверхности разрушения, а также допустимой степенью неравномерности температуры в виде $\alpha = T_{\min}/T_{\max}$, можно находить минимально допустимые величины x_1 . Сопоставление влияния параметров образца и поверхностей разрушения показывает, что сильнее всего на выборе расстояния x_1 сказываются условия задачи 1 (глубина надрезов на образце).

Глава III "Экспериментальные исследования при разработке термо-электрического метода определения удельной работы разрушения металла". Для выявления технической возможности регистрации теплового эффекта разрушения металла термоэлектрическим способом и фактического уровня этого эффекта использовалась испытательная схема из консольно закреплённого образца, надрезанного по периметру, двух приваренных к нему термоэлектродов и гальванометра. Разрушение образца производили вначале слесарным молотком, позднее — на копре. Гальванометр с постоянной 13 мкв/дел. отчётливо реагировал на тепло, выделявшееся при совершенно хрупком разрушении образца (Ст.Зкп, сечение $\approx 1 \text{ см}^2$). Вместе с тем выявились факторы, которые требовали специальных исследований при разработке конструкции образца и схемы нагружения: значительная пластическая деформация металла образца в сжатой зоне и в местах его крепления и неплоскостность поверхности разрушения. Специальные эксперименты позволили установить, что введение твёрдых прокладок под зажимные болты, удаление сжатой зоны металла образца и замена её твёрдой вставкой сводит до незначительного уровня влияние побочных пластических деформаций. Переход к низкотемпературным испытаниям выявил сильное влияние радиационного теплообмена поверхности разрушения с окружающими деталями испытательной установки на точность регистрации теплового эффекта. Для устранения этого влияния использовали прин-

ции симметрии в конструкции образца и в схеме нагружения. Исследованы схемы ударного изгиба образца и статического растяжения. На рис. I показана конструкция консольного (тип I) и симметричного (тип II) образцов.

Были сопоставлены различные варианты крепления сплавов ЕТП: в боковых и осевых каналах при конденсаторной приварке термоэлектродов торцом, на поверхности образца при точечной конденсаторной приварке. Последний вариант оказался лучшим.

Точность и надёжность измерений при термоэлектрическом методе помимо учёта помех и знания термоэлектрических свойств ЕТП зависит от чувствительности и точности регистрирующего прибора. Такие приборы как электронный и шлейфовый осциллографы даже при подключении их через усилители не могут быть использованы в качестве регистраторов малых сигналов ЕТП. Только магнитоэлектрические гальванометры некоторых марок вполне отвечают требованиям. Однако, ввиду большой инерционности их подвижных систем с одной стороны и импульсного характера сигнала от ЕТП - с другой, возникла задача тарирования гальванометров в динамическом режиме. Было опробовано несколько способов и приспособлений для динамической тарировки и в качестве рабочего был принят способ тепловой имитации сигнала. Для этого способа были разработаны прибор и методика тарировки, которая позволяет определять поправочный коэффициент, вводимый в расчёт удельной работы разрушения металла.

Сущность динамической тарировки гальванометра состоит в том, что один и тот же тепловой импульс, вводимый в образец, регистрируется рабочим гальванометром и контрольным гальванометром; при этом спай контрольного прибора располагается значительно дальше, чем спай рабочего, вследствие чего контрольный прибор даёт истинное значение термоЭДС своего спая. По показаниям контрольного прибора вычисляют мощность источника тепла и по нему - действительную температуру в точке "горячего" спая рабочего прибора. Поправочный коэффициент вычисляют по формуле:

$$K_{гр} = \frac{C_{и2} \cdot x_2 \cdot \Delta n_{г2}}{C_{и1} \cdot x_1 \cdot \Delta n_{г1}}, \quad (13)$$

в которой $C_{и1}$ и $C_{и2}$ - постоянные по напряжению рабочего и контрольного гальванометров, x_1 и x_2 - расстояния "горячих" спаев от торца образца, $\Delta n_{г1}$ и $\Delta n_{г2}$ - показания гальванометров. Коэффициент $K_{гр}$ вычисляют как среднее из нескольких значений.

Основной объём экспериментальных работ произведён на установке, в которой использовался специально разработанный вертикальный коплёр; захват для образца обеспечивал испытание его при чистом изгибе,

криокамера охлаждалась жидким азотом, регистрацию сигнала ЕТП вели гальванометром М21/6 с постоянной $0,374 \cdot 10^{-6}$ в/дел. Были также опробованы другие виды нагружающих устройств: маятниковый копресс, пороховой пресс. Удельную работу разрушения вычисляли по рабочей формуле, полученной конкретизацией (3):

$p = x \cdot \Delta n_r \cdot K \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\Sigma} \cdot K_{\Pi r}$ (14), $p_s = x \cdot \Delta n_r \cdot K \cdot K_{\Sigma} \cdot K_{\Pi r}$ (15), в которых x - расстояние "горячего" спая ЕТП до поверхности разрушения, Δn_r - отсчёт по прибору, K - коэффициент, объединяющий все постоянные величины, K_{Π} - коэффициент, учитывающий распределение тепла с поверхности разрушения на всё сечение образца, K_{Σ} - коэффициент, учитывающий конкретную неравномерность температуры в сечении образца с "горячим" спаем, $K_{\Pi r}$ - поправка на инерционность гальванометра.

Глава IV "Результаты использования разработанного метода определения удельной работы разрушения металла". Поскольку настоящая работа посвящена разработке метода исследования, а не самому исследованию конкретного материала, то объём практического применения метода был выбран таким, какой необходим для суждения об его возможностях. В качестве материала для образцов были взяты распространённые стали Ст.3сп и ЮГ201, которые используются также для изготовления металлоконструкций, эксплуатируемых при отрицательных температурах. Кроме того, исследовался металл некоторых зон сварных соединений. Были изготовлены и испытаны образцы: а) из сталей Ст.3сп и ЮГ201 в состоянии поставки, б) из этих же сталей после деформационного старения ($\epsilon_{\text{ост}} = 10\%$, $T_{\text{выд}} = 250^\circ\text{C}$, $t_{\text{выд}} = 2$ ч.), в) из стали Ст.3сп после закалки от 930°C в воду, г) из металла швов, выполненных дуговым способом, д) из сталей Ст.3сп и ЮГ201 на участке деформационного старения в зоне термического влияния шва (определён по пробе Чабелки). Заготовка образцов велась так, чтобы разрушение происходило поперёк прокатки. При сварке пластины жёстко закреплялись; обработку кромок пластин для случая исследования ЗТВ делали одностороннюю под углом 50° . Надрезы на сварных образцах размечали по макрошлифам и наносили вдавливанием ножа из стали Р18 с углом заострения 30° . Все испытания проведены на образцах типа П. Температурный диапазон исследования - от $+20$ до -60°C через 20 градусов. Партию образцов брали из 5 штук.

Результаты испытаний образцов приведены в таблице. Отмечался разброс результатов, который можно объяснить либо с ошибками измерений, либо неравномерностью свойств исследованных материалов.

Таблица
Удельная работа разрушения стелей Ст.Зсп и ЮГ2С1 и сварных соединений из них

Вид и состояние металла	Р, Дж/см ² , при температуре испытания, ОС				
	+20	0	-20	-40	-60
В состоянии поставки	Ст.Зсп	4,24	3,46	2,30	2,54
	ЮГ2С1	10,6	5,96	5,50	7,57
После деформационного старения	Ст.Зсп	3,24	3,03	2,89	2,63
	ЮГ2С1	10,8	4,64	4,54	6,10
После закалки (ТЭМ)	Ст.Зсп	8,21	3,45	4,12	6,54
То же при испытаниях на копре	Ст.Зсп	16,2	12,0	9,60	11,90
	Металл шва				
электроды МР-3	СтЗсп	10,8	3,47	2,10	2,90
	ЮГ2С1				
электроды УОНИ-13/45	СтЗсп	14,2	11,8	8,02	7,93
	ЮГ2С1				
Участок старения в ЗТВ	Ст.Зсп	3,14	2,80	2,62	2,90
	ЮГ2С1	15,5	7,24	8,25	6,37

Ошибки измерений были вычислены, самое неблагоприятное их сочетание лежит в пределах $+12,95\%$ - $-11,55\%$, что меньше фактического разброса. При отбрасывании результатов с отклонением от среднего, большим 25% , характер изменения удельной работы разрушения остаётся прежним; по-видимому, основной причиной разброса значений r является неравномерность свойств металла. Весь исследованный температурный диапазон отчётливо делится (для Ст.3сп) на два участка: от $+20$ до -20 °C и от -20 до -60 °C. Наименьшей сопротивляемостью распространению трещин обладает участок деформационного старения в ЗТВ. Принятый режим искусственного деформационного старения близко имитирует процесс старения металла в ЗТВ. Закалка Ст.3сп повышает её сопротивляемость распространению трещин, хотя при -20 °C её эффект невелик. Для сопоставления были проведены испытания надрезанных по периметру образцов из закалённой стали Ст.3сп на маятниковом копре по известной методике. Результаты этих испытаний (см. таблицу) аналогичны полученным с применением термоэлектрического метода; некоторое общее повышение r связано с дополнительными энергетическими затратами, характерными для испытаний на ударную вязкость.

Результаты и опыт использования термоэлектрического метода позволяют сделать вывод о практической пригодности его для исследования сопротивляемости металла и сварных соединений распространению трещин. Он обладает рядом достоинств: а) практической независимостью результатов измерений от конструкции образца и способа его нагружения, если обеспечен необходимый характер разрушения; б) возможностью регистрации удельной работы разрушения на различных участках движения трещины в образцах весьма крупных размеров; в) возможностью измерения малых уровней удельной работы разрушения; г) возможностью весьма точного разделения удельной работы разрушения на составляющие, связанные с плоской пластической деформацией и с утяжкой (путём испытаний однотипных образцов с надрезами и без надрезов). С помощью термоэлектрического метода можно измерять удельную работу разрушения металла при максимальной скорости движения трещины, что для механических способов вообще недоступно.

Специфические достоинства термоэлектрического метода определяют области его эффективного применения: а) испытание металла и сварных соединений в условиях, близких к эксплуатационным; в качестве объектов испытания при этом могут быть использованы различные, в том числе весьма крупные, образцы, модели, макеты и на-

турные конструкции (трубы, сосуды и др.); б) испытания образцов и конструкций при низких температурах. На основе настоящего исследования с целью внедрения термоэлектрического метода в практику разработаны рекомендации по применению термоэлектрического метода (ТЭМ) определения удельной работы разрушения низкоуглеродистых и низколегированных сталей при низких температурах. В диссертации и в рекомендациях сформулированы принципиальные условия успешного применения ТЭМ, касающиеся главным образом обеспечения неизменной температуры в окрестностях спаяв ЭТП при испытаниях. Дальнейшее совершенствование ТЭМ связано с поиском безынерционного способа измерения малых сигналов ЭТП, разработкой способов нагружения, обеспечивающих полное устранение побочных тепловых эффектов, исследованием зависимости уровня регистрируемой p от размеров образца и, следовательно, от скорости распространения трещины.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа составляющих энергетических затрат в процессе разрушения металла показано, что:

- а) не менее 90% работы разрушения расходуется на пластическую деформацию,
- б) характеристикой сопротивляемости металлу распространению трещин является удельная работа плоской пластической деформации; в листовом металле удельная работа разрушения включает также удельную работу пластической утяжки по краям трещины.

2. Показано, что работа пластической деформации реализуется в виде тепловой энергии, которая может быть измерена термоэлектрическим способом.

3. Исследованы особенности распространения тепла для некоторых характерных форм разрушения и поверхностей разрушения, а также в зависимости от конструкций образцов.

4. Разработана методика измерения удельной работы разрушения металла термоэлектрическим способом.

5. По результатам сопоставления существующих методов исследования сопротивляемости металлу распространению трещин с термоэлектрическим определены области эффективного применения последнего, в которых применение существующих методов затруднительно или невозможно:

- а) регистрация удельной работы разрушения на различных участках движения трещины в крупных образцах или конструкциях,
- б) измерение малых величин удельной работы разрушения при хрупких разрушениях.

6. Разработана и изложена в виде рекомендаций методика и технология испытаний образцов и конструкций с применением термоэлектрического метода, в том числе при отрицательных температурах.
7. Произведено опробование термоэлектрического метода при исследовании конструкционных сталей Ст.3сп и 10Г2С1 и сварных соединений из них.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Винокуров В.А., Черкасов В.К. Способ определения механической характеристики. Авторское свидетельство № 246904, бюллетень № 21, 1969.
2. Черкасов В.К. Свойства и сопротивляемость разрушению металла сварных соединений. В сб. "Исследования по работоспособности и технологии сварных конструкций", Иркутск, 1970.
3. Черкасов В.К. Методы определения работы разрушения металла, там же.
4. Винокуров В.А., Черкасов В.К. О термоэлектрическом методе определения удельной работы разрушения металла. Известия ВУЗов. Машиностроение, № 4, 1971.
5. Винокуров В.А., Черкасов В.К. К разработке термоэлектрического метода определения удельной работы разрушения металла. Известия ВУЗов. Машиностроение, № 5, 1972.

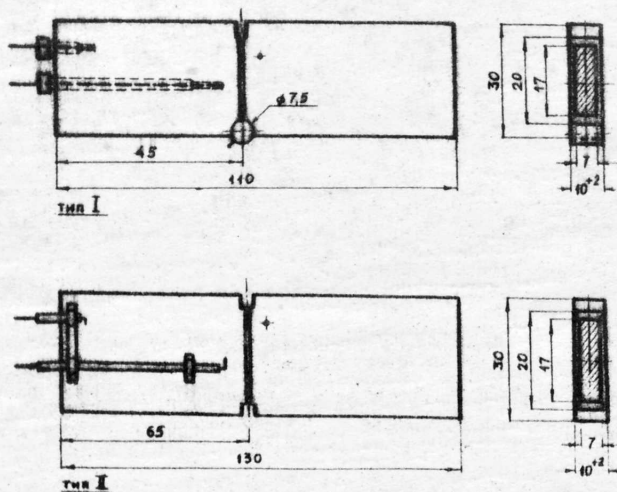


Рис 1