

М473484

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

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

На правах рукописи

ПЕТРОВ Сергей Юрьевич

УДК 621.791.052

ИЗЫСКАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ
В СВАРНЫХ ТРУБАХ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ
РАЗРУШЕНИЙ

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических
наук

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 ВИНЮКОВ В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ХАКИМОВ А.Н.
кандидат технических наук,
с.н.с. ГОРИЦКИЙ В.Н.

Ведущее предприятие - ВНИИГАЗ, г.Москва

Защита диссертации состоится "24" 03 1988 г.
в 14³⁰ часов на заседании специализированного совета
КО53.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техни-
ческом училище им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская, 5.

Ваше
чество, проси

С д
им.Н.Э.Баум

Авт

Уче
специали
К.Т

Д-46087

Подписан
Тираж 10

N 443477

Актуальность проблемы. Повышение надежности магистральных газопроводов неразрывно связано с исключением возможности появления в них протяженных разрушений. Предотвращения протекших разрушений путем использования труб из весьма вязких высоколегированных и термически упрочненных сталей очень дорого. Использование гасителей предполагает возможность разрушения трубопровода на участке между соседними гасителями; кроме того гасители содержат в себе ребра жесткости, прорези, различного рода обрамления и т.д., которые увеличивают концентрацию напряжений и сами могут являться источниками разрушений. Один из наиболее эффективных приемов остановки быстро распространяющейся трещины является её увод по винтовой линии созданными в каждой трубе спиральными зонами с неоднородными механическими свойствами. Отсутствие практических рекомендаций по выбору параметров этих зон обусловлено слабой изученностью напряженно-деформированного состояния в области разрушения при взаимодействии трещины с механически неоднородными, в частности, упрочненными зонами. Не менее важными в практическом отношении являются исследования вопросов оценки технологии получения термоупрочненных зон в трубах.

Цель работы состоит в разработке рекомендаций по выбору параметров спиральных термоупрочненных зон для остановки протяженных разрушений магистральных газопроводов и технологии их получения.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя: метод конечных элементов, теорию подобия и моделирования, методы корреляционного и регрессионного анализа.

Экспериментальные методы состояли: в испытании образцов из труб на ударный разрыв, определении ударной вязкости на образцах типа Шарпи, испытании гагаринских образцов на растяжение, замере твердости по Виккерсу (HV), термообработке образцов и проведении натурных испытаний труб.

Научная новизна заключается:

- в установлении и описании механизма остановки разрушения вследствие взаимодействия движущейся в вязком матери-



але с упрочненной зоной трещины и получении зависимости, устанавливающей сочетание параметров этой зоны, необходимое для отклонения трещины и торможения разрушения;

- в разработке методики определения значений технологических факторов, обеспечивающих за счет нагрева и последующего охлаждения получение требуемых упрочненных зон в трубах большого диаметра с толщиной стенки до 20 мм. на основе установленных зависимостей механических свойств стали I7Г1С от параметров термического цикла.

Практическая ценность работы.

1. Разработана модифицированная программа для ЭВМ, позволяющая определить напряженно-деформированное состояние в пластине с движущейся трещиной при подходе ее к расположенной под углом к траектории движения механически неоднородной зоной и энергетически наиболее выгодное направление движения трещины.

2. Для расчетного и экспериментального определения параметров упрочненных зон получены зависимости: степени отклонения трещины от параметров упрочненных зон и твердости от параметров термического цикла для стали I7Г1С и от её предела текучести.

3. Разработан комплекс программ по определению нестационарных температурных полей в двумерном теле с использованием метода конечных элементов, позволяющий рассчитывать параметры термического цикла в точках тела при нагреве и сопутствующем охлаждении.

4. Разработаны рекомендации по повышению сопротивляемости труб протяженному разрушению трубопроводов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы использованы: а) при получении упрочненных зон в трубах, натурные испытания которых подтвердили работоспособность разработанных рекомендаций; б) в учебном процессе и проведении НИР на кафедре "Машины и технология сварочного производства" Ворошиловградского машиностроительного института.

Основные положения работы докладывались на II конференции молодых ученых в ИМАШ АН СССР (26 марта 1987г.) и на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им.Н.Э.Баумана (29 декабря 1986г. и 26 ок-

тября 1987г.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков, 15 таблиц и 148 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние вопроса

По мере перемещения сырьевой базы в северные районы нашей страны возрастает протяженность трубопроводных магистралей преимущественно большого диаметра и высокого давления. Полностью исключить вероятность зарождения и распространения протяженных разрушений в реальном газопроводе не представляется возможным. Отказы, вызываемые аварийными ситуациями, приводят к нарушению газоснабжения промышленных районов и приносят большой народнохозяйственный ущерб.

Поэтому наряду с мерами предотвращения аварий существенное значение приобретает их локализация, то есть уменьшение протяженности возникающих разрывов.

Имеется две возможности по предотвращению протяженных разрушений магистральных газопроводов – это изготовление труб из металлов с высокой вязкостью и применение гасителей трещин.

Необходимо учитывать, что высокоскоростное деформирование материала стенки трубы в процессе её разрушения затрудняет пластическую деформацию металла и исключает полную реализацию достигнутых дорогой ценой в промышленности вязких свойств стали. В таких условиях наиболее перспективным оказывается не металлургический, а конструкционный подход. Проблему решают путем постановки в газопроводах гасителей трещин.

К настоящему времени разработан ряд гасителей протяженных разрушений. В работе показано, что наиболее рационально увеличить длину пути, проходимой трещиной до торможения, и рассеивание энергии истекающего газа путем изменения направления движущейся трещины по спиральной траектории. Сварные швы или искусственно созданные по винтовой линии зоны с неоднородными механическими свойствами в самой трубе могут рассматриваться как своеобразные инициаторы отклонения тре-

щины в нужном направлении (рис. I). Зоны могут быть получены локальной термообработкой материала стенки трубы с помощью горелок или нагревом токами высокой частоты (ТВЧ).

Имеющиеся в литературе объяснения причин отклонения трещины, расположенной под углом к ее траектории неоднородной зоной, имеют противоречивый характер. Ряд авторов считает, что управлять распространением трещины в газопроводе можно с помощью местных остаточных сжимающих напряжений на границе зоны. Другие исследователи объясняют искривление траектории трещины вблизи сварного шва влиянием его анизотропии. Использование в газопроводах вязких сталей приводит к тому, что ширина зоны пластических деформаций при разрушении составляет 0,1+0,6 м. При таких больших пластических деформациях влияние остаточных напряжений не может быть значительным. Поскольку объяснение отклонения трещины неоднородными по механическим свойствам зонами не убедительно, а также отсутствуют практические рекомендации по выбору их параметров, данный подход не нашел широкого применения в практике строительства. В то же время есть основание предполагать, что именно этот путь является наиболее экономичным и технологичным.

На траекторию разрушения значительное влияние оказывают скорость нагружения, напряженно-деформированное состояние (НДС) в вершине трещины, изменение механических свойств материала. В экспериментах наиболее полно проявляется поведение материала при разрушении, в то время как распределение напряжений и деформаций в зоне разрушения удобнее получать на основе численного решения упруго-пластической задачи о движении трещины в пластине. Важным с практической точки зрения являются и исследования вопросов оценки технологии получения термоупрочненных зон в трубах.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Сформулировать характер взаимодействия движущейся в пластине трещины с механически неоднородной зоной и разработать конечноэлементную модель для его описания.
2. Определить напряженно-деформированное состояние у вершины движущейся трещины при подходе ее к упрочненной зоне.
3. Экспериментально исследовать влияние параметров уп-

роченных зон на траекторию разрушения.

4. Изучить влияние параметров термического цикла на механические свойства стали ИТТС.

5. Разработать рекомендации по выбору параметров упрочненных зон и технологии их получения для практического применения при проектировании технологии изготовления труб для магистральных газопроводов.

Глава 2. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в вершине движущейся трещины в пластине с упрочненной зоной

Решение задачи об упругопластическом равновесии тел с трещинами в точной постановке связано с большими трудностями. Поэтому в механике деформируемого твердого тела нашли широкое применение численные методы, в частности, метод конечных элементов (МКЭ).

На основе МКЭ в работе предложена модель, описывающая движение трещины в пластине с механически неоднородными зонами, расположенными под углом к траектории прямолинейного разрушения. В рассматриваемой модели остаточные напряжения не задавались и свойства во всех направлениях были одинаковы, т.е. анизотропия свойств материала отсутствовала. Реализация модели на ЭВМ дает информацию о нагружении металла в вершине трещины и эпюру пластических деформаций в области разрушения. Численная модель позволяет с энергетических позиций определить предпочтительное направление роста трещины при продвижении ее на следующем шаге. Отличие предлагаемого алгоритма от случая прямолинейного движения трещины заключается в определении изменения энергии пластины при движении трещины в трех возможных направлениях. Угол наиболее выгодного в энергетическом отношении движения трещины на следующем шаге определяется путем построения аппроксимирующего уравнения второго порядка и определении его экстремума.

Показано, что непосредственной причиной изменения направления движения трещины является наличие зоны, расположенной под углом к траектории движения трещины и отличающейся от основного материала по уровню предела текучести. При подходе трещины к упрочненной зоне деформация металла в направлении движения трещины уменьшается и происходит, в основном, вдоль

границы зоны (рис.2). Угол поворота главных площадок при этом увеличивается и максимальное его значение достигается на границе упрочненной зоны, причем в случае широкой зоны (h_3) углы больше. При изменении ширины зоны до размера зоны пластических деформаций в упрочненном материале асимметрия поля пластических деформаций увеличивается.

В случае разрушения газопроводов из спиральношовных труб движущаяся трещина взаимодействует с более прочным сварным швом. В связи с тем, что ширина и степень упрочнения шва малы, пластическая деформация развивается по всей его ширине, а также и в основном материале. Таким образом, трещина проходит через упрочненную зону без отклонения. Поэтому для торможения разрушения необходимо создавать искусственные упрочненные зоны с шириной, превышающей размер зоны пластических деформаций при квазистационарном разрушении упрочненного материала.

Анализ полученных в результате решения упругопластической задачи показал, что с увеличением таких параметров как ширина и степень упрочнения зоны степень отклонения трещины вдоль границы зоны должна возрастать.

Полученные в результате расчетов данные позволили выделить параметры зон, влияющие на отклонение трещины, и провести в дальнейшем их экспериментальное исследование.

Глава 3. Экспериментальное исследование разрушения об-разцов из труб с неоднородными механическими свойствами и термообработки стали ЛТЭС

В методике обработки результатов испытаний обоснована возможность применения теории подобия и моделирования к описанию процессов разрушения труб на основании использования безразмерных комплексов. В качестве геометрического параметра, характеризующего процесс развития трещины при вязком разрушении, принята интегральная величина — пластическое раскрытие у вершины трещины — δ . На основании проведенных расчетов и экспериментального анализа выделены основные факторы, определяющие траекторию движения трещины в трубах со спиральными упрочненными зонами: угол наклона зоны к продольной оси α ; степень упрочнения $S_y = (\sigma_{t3} - \sigma_{t0}) / \sigma_{t0}$; безразмерное пластическое раскрытие $p = \delta / \Delta$; безразмерная ширина $h = h_3 / \delta$ (рис.1). В качестве критерия отклонения трещины S принято

отношение максимального угла отклонения трещины, наблюдаемого в эксперименте, α_3 к α .

Для установления количественной связи между исследуемыми факторами получена зависимость предела текучести σ_T от твердости HV :

$$1205 - 12,86 \cdot 10^5 / HV, \text{ МПа}, \quad (1)$$

которая позволяет определить численные значения параметров упрочненной зоны (ширину переходной зоны $-\Delta$, σ_{T3} , h_3) по распределению σ_T .

Испытания на динамический разрыв проводили по методу MBTU им. Н.Э.Баумана. При испытании по этому методу образцов из труб 219х4 мм стали 17Г1С установлено, что наибольшее искривление траектории трещины S , то есть уход ее вдоль границы упрочненной зоны, наблюдается при углах α , близких к 30 градусам. Результаты испытаний по исследованию влияния S_y , ρ , h на степень отклонения трещины S приведены в таблице I.

При обработке экспериментальных данных методами корреляционного и регрессионного анализа установлена зависимость степени отклонения трещины от исследованных факторов:

$$S = 2,5 \cdot (\cos \alpha)^{2,9} \cdot (\sin \alpha)^{0,89} \cdot S_y^{1,16} \cdot \rho^{0,57} \cdot h^{0,35} \quad (2)$$

Полученная зависимость позволяет аналитически определить степень увода трещины в сторону при различных значениях параметров упрочненных зон, а также используется для выбора требований к технологическим характеристикам процесса получения этих зон в трубах.

Обеспечение необходимой структурно-механической неоднородности в трубах базируется на известном положении о зависимости их свойств от параметров термического цикла. В работе установлена зависимость твердости (HV) стали 17Г1С от параметров термического цикла:

$$HV = 2923 - 4,56 \cdot \omega_0 + 0,361 \cdot \omega_n \cdot \omega_0 - 33,1 \cdot \omega_n \cdot t + 0,125 \cdot \omega_0^2 + 0,2 \cdot \omega_n + 0,16 \cdot t^2 - 0,16 \cdot t \cdot \omega_0, \quad (3)$$

где ω_n — скорость нагрева в интервале температур 750+950°C;

ω_0 — скорость охлаждения в интервале температур 950+500°C;

t – длительность пребывания при температуре 950°C .

Данная зависимость позволяет осуществить выбор режимов термообработки для получения заданного распределения HV по ширине зоны.

Глава 4. Определение рациональных параметров упрочненных зон в трубах и условия их получения

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса взаимодействия движущейся трещины с упрочненной зоной позволили предложить методику выбора параметров этих зон (b_{T3}, Δ, h_3) и технологических характеристик термообработки (скорость термообработки $-V_{T0}$, площадь нагрева $-F_H$, мощность источника тепла q_u , размеры охлаждаемой поверхности $-F_0$, расстояние от источника тепла до F_0). В соответствии с этим в методике выделено два этапа:

I этап – определение значений параметров $\alpha, b_{T3}, \Delta, h_3$, упрочненных зон;

II этап – определение параметров технологического процесса.

Исходными данными для первого этапа являются: предел текучести b_{T0} и диаметр трубы.

Численные значения b_{T3}, Δ, h_3 зависят от S_y, ρ, h , которые для степени отклонения трещины $S=I$, обеспечивающей увод трещины в сторону, определяются из соотношения (2). Если в расчетах значение $S \geq I$, то это означает, что трещина гарантированно уходит вдоль границы зоны. Получены конкретные значения параметров упрочненных зон, обеспечивающих отклонение трещины: угол наклона зоны к образующей трубы $\alpha \approx 30^{\circ}$; степень упрочнения $-S_y \geq 0,65$; пластическое раскрытие $\rho \geq 0,65$ и ширина зоны $h \geq 12,5$.

Значение пластического раскрытия у вершины трещины δ определяется либо по результатам натурных испытаний труб (по методу ВНИИСТ), либо по испытанию образцов из этих труб (по методу МВТУ им. Н.Э.Баумана).

При известных S_y, ρ, h, δ значения b_{T3}, Δ, h_3 определяются из неравенств:

$$b_{T3} \geq (1 + S_y) \cdot b_{T0}; \quad \Delta \leq \delta / \rho; \quad h_3 \geq h / \delta. \quad (4)$$

Таблица I.

Результаты испытания сварных образцов из
 стали 17Г1С с упрочненными спиральными зонами ($\alpha = 30^\circ$)

№№ п/п	№ образца	Факторы			Степень откло- нения трещины δ
		S_y	$\rho = \delta/\Delta$	$h = h_3/\delta$	
I.	37	0,27	0,3	10,0	0,23
2.	42	0,28	0,4	10,21	0,3
3.	33	0,31	0,3	11,46	0,27
4.	26	0,34	0,533	8,33	0,34
5.	20	0,34	0,253	10,21	0,26
6.	34	0,37	0,3	14,00	0,33
7.	36	0,42	0,436	12,08	0,38
8.	41	0,42	0,192	12,5	0,25
9.	38	0,46	0,582	9,5	1,0
10.	32	0,46	0,48	12,5	0,64
11.	24	0,57	2,5	13,33	1,0
12.	19	0,62	2,222	10,21	0,38
13.	44	0,62	0,192	13,33	0,34
14.	31	0,66	0,582	6,67	0,65
15.	33	0,73	0,25	10,21	1,0
16.	39	0,76	0,25	12,5	1,0
17.	27	0,93	0,48	12,5	1,0
18.	40	0,95	0,533	13,5	1,0
19.	23	1,0	2,222	12,5	1,0
20.	30	1,0	0,261	12,5	1,0
21.	28	1,0	0,48	10,21	1,0
22.	21	1,1	0,533	11,46	1,0
23.	29	1,13	0,533	13,33	1,0
24.	22	1,18	0,3	13,5	1,0

Величины Δ , h_z , b_{tz} зависят от изменения b_t при переходе от основного металла к упрочненной зоне (рис.1). Экспериментально распределение b_t определяется путем замера твердости HV по ширине зоны и пересчетом полученных значений в предел текучести. Для стали 17Г1С можно воспользоваться зависимостью (1).

На II этапе определяются параметры технологического процесса (V_{to} , F_n , q_u , F_o , L) для получения спиральных зон с заданными значениями параметров (Δ , h_z , b_{tz}).

При экспериментальной или расчетной (численными методами на ЭВМ) отработке технологии термообработки в качестве начальных рекомендуется следующий выбор технологических параметров: $V_{to}=0,2+20$ см/с; ширина нагреваемой площади - $a=(1+1,2) \cdot h_z$, а длина - $l \leq h_z$; мощность источника тепла - $q_u = C_{\gamma} \cdot T \cdot a \cdot V_{to} \cdot \varepsilon$; размеры охлаждаемой площади F_o соответственно - ширина $c = (1,1+1,5) \cdot a$, длина $l \leq c$; $L \approx V_{to} \cdot t$. Для определения технологических параметров необходимо знать объемную теплоемкость материала - C_{γ} , толщину стенки трубы - ε и температуру - T , до которой происходит нагрев зоны. По значениям V_{to} , F_n , q_u , F_o , L находят параметры термического цикла (ω_n , t , ω_o), а затем твердость в точках на оси Y (рис.1). Для стали 17Г1С можно воспользоваться зависимостью (3). Для других материалов аналогичную зависимость можно получить на основе имитации условий термообработки по методике МИНГ им.И.М.Губкина. Полученное распределение твердости используется при оценке S_y , ρ , h . Если совокупность полученных значений согласно (2) приводит к $S \gg 1$, т.е. к отклонению трещины, расчет заканчивается.

В противном случае, задаваясь новыми V_{to} , F_n , q_u , F_o , L определяют такое соотношение этих величин, которое обеспечивает получение зон с параметрами, удовлетворяющими значению $S \gg 1$.

Проведено исследование возможностей разработанных методик на конкретных примерах оценки параметров упрочненных зон и технологии их получения для труб различного диаметра. Получение рекомендации по выбору данных параметров были использованы для изготовления натурных образцов, результаты испытания которых подтвердили эффективность использования данных

рекомендаций для предотвращения разрушения трубопроводов. Это свидетельствует о работоспособности созданной методики и справедливости полученных выводов.

На основании полученных в работе результатов исследований разработаны "Рекомендации по повышению сопротивляемости труб протяженному разрушению", которые предназначены для трубных заводов и НИИ для проведения ими исследовательских работ по технологии создания упрочненных зон в трубах, используемых при прокладке газопроводов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Решение проблемы остановки протяженных разрушений трубопроводов путем повышения вязких свойств трубных сталей представляется недостаточно эффективным вследствие дороговизны и дефицитности ряда легирующих элементов. Более перспективным представляется использование конструкционного подхода, заключающегося в создании зон с неоднородными механическими свойствами. Промышленная реализация этого приема сдерживается слабой изученностью механизма взаимодействия распространяющейся трещины с механически неоднородными зонами и отсутствием практических рекомендаций по выбору параметров этих зон и технологии их получения.

2. Для исследования процесса взаимодействия трещины с механически неоднородными зонами, расположенными под углом к траектории ее движения, использован метод конечных элементов и теория течения для упрочняющегося материала. Определено изменение положения главных осей напряжений и наиболее выгодное в энергетическом отношении направление движения трещины при ее подходе к упрочненной зоне, расположенной под углом к продольному направлению движения трещины.

3. Анализ расчетных данных, полученных при решении упругопластической задачи показал, что

— непосредственной причиной изменения предпочтительного направления движения трещины является наличие упрочненной зоны, расположенной под углом к траектории движения трещины и отличающейся от основного металла по уровню предела текучести;

- наибольшая тенденция к отклонению трещины от прямолинейного движения наблюдается непосредственно перед входом ее в упрочненную зону, что способствует уводу трещины вдоль границы упрочненной зоны;

- для увода трещины в сторону необходимо создание упрочненных зон шириной, превышающей размер зоны пластических деформаций в упрочненном материале;

- ширина сварных швов в спиральношовных трубах недостаточна для отклонения трещины в сторону.

4. С использованием теории подобия и моделирования, методами корреляционного и регрессионного анализа результатов экспериментов по разрушению образцов из труб получена зависимость степени отклонения S трещины вдоль границы зоны от параметров упрочненной зоны (угла наклона зоны к продольной оси - α , степени упрочнения - S_y , безразмерного пластического раскрытия металла при разрыве - ρ и безразмерной ширины упрочненной зоны - h):

$$S = 2,5 \cdot (\cos \alpha)^{2,9} \cdot (\sin \alpha)^{0,89} \cdot S_y^{1,16} \cdot \rho^{0,57} \cdot h^{0,35}$$

Данная зависимость может быть использована для выбора сочетания параметров этих зон, обеспечивающего увод трещины в сторону ($S \geq 1$) и остановку протяженного разрушения трубопровода. Рекомендуется следующее сочетание параметров: $\alpha \leq 30^\circ$; $S_y \geq 0,65$; $\rho \geq 0,6$; $h \geq 12,5$.

5. Специальными исследованиями стали ИТГЭС установлена зависимость предела текучести σ_T от твердости HV в виде:

$$\sigma_T = 1203 - 12,86 \cdot 10^5 / HV, \text{ МПа,}$$

а также твердости от параметров термического цикла (скорости нагрева в интервале температур $750-950^\circ\text{C}$ - ω_n , времени выдержки при температуре 950°C - t , скорости охлаждения в интервале температур $950-500^\circ\text{C}$ - ω_b):

$$HV = 2923 - 4,56 \cdot \omega_b + 0,361 \cdot \omega_n \cdot \omega_b - 33,1 \cdot \omega_n + 0,125 \cdot \omega_b^2 + 0,2 \cdot \omega_n^2 + 0,16 \cdot t^2 - 0,16 \cdot t \cdot \omega_b, \text{ МПа.}$$

Полученные зависимости позволяют осуществить выбор режимов термической обработки для получения рекомендуемого распределения по ширине зоны.

6. Расчетами показано, что необходимые по размерам и свойствам упрочненные зоны в металле трубы могут быть получены нагревом, близким к сварочному, с последующим охлаждением водой или водовоздушной смесью; для нагрева могут быть исполь-

зованы токи высокой частоты, газовые горелки и другие сварочные источники тепла.

7. На базе проведенных расчетных и экспериментальных исследований разработана методика выбора параметров упрочненных зон, обеспечивающих отклонение трещины вдоль границы зоны, а также технология получения этих зон. Результатами натурных испытаний труб, обработанных согласно полученным рекомендациям, подтверждена работоспособность созданной методики и справедливость полученных выводов.

Основное содержание работы отражено в следующих работах:

1. Винокуров В.А., Петров С.Ю., Маханев В.О. Влияние неоднородности механических свойств на изменение напряженно-деформированного состояния у вершины трещины и траекторию ее движения // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - № II. - С.5-8.

2. Винокуров В.А., Петров С.Ю. Влияние параметров упрочненных зон на торможение протяженных разрушений в магистральных газопроводах // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - № 12. - С.9-11.

3. Петров С.Ю., Винокуров В.А. Влияние параметров упрочненных зон на торможение протяженных разрушений в газопроводах // Сборник тез II конференции молодых ученых в ИМАШе АН СССР. - М.: ИМАШ, 1987. - С.38.

4. Петров С.Ю., Голофаев А.Н. Пакет прикладных программ "Р.ГЕМ" // Информ.листок ЦНТИ (Воронеж). - 1985. - № 218-85.

5. Положительное решение (СССР), МКИ В23К28/00, №4161564 25-08. Труба для магистрального трубопровода. / В.А.Винокуров, С.Ю.Петров, Г.И.Макаров, заявлено 15.12.1986.

Петров

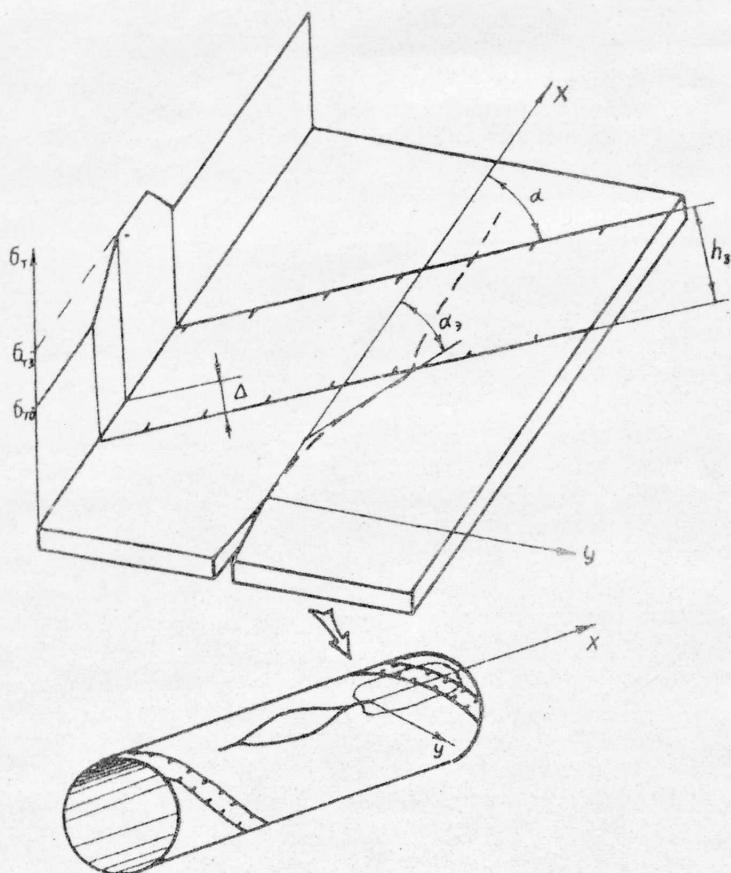
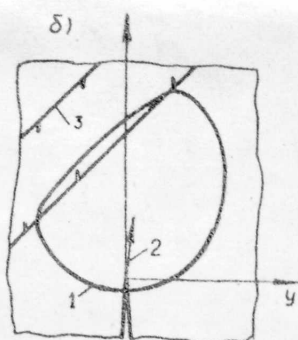
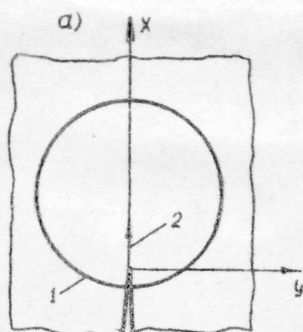


Рис. I. Схема изменения свойств в трубе с винтовой механически неоднородной зоной: - - - траектория движения трещины



квазистационарное поле

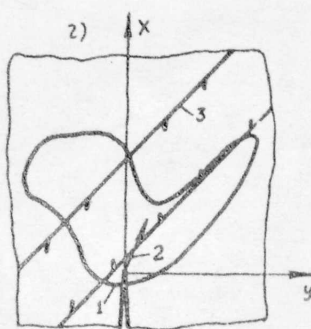
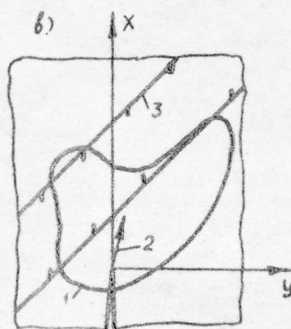


Рис.2. Эволюция формы зоны пластических деформаций (1) и положение площадок главных напряжений (2) при взаимодействии трещины с упрочненной зоной (3):
а, б, в, г - фазы роста трещины