

М 3238/6
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

МАКАРОВ Иван Иванович

На правах рукописи

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ

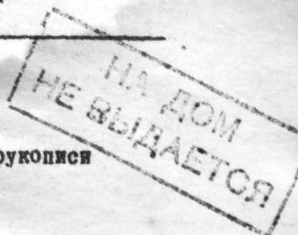
(Специальность 05.04.05 – "Технология и машины
сварочного производства")

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

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

МАКАРОВ Иван Иванович

На правах рукописи



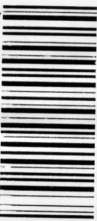
РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ

(Специальность 05.04.05 - "Технология и машины
сварочного производства")

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

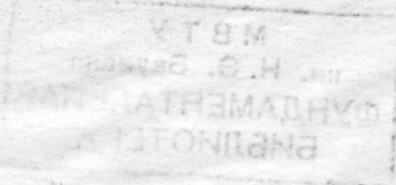
и

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1325816

Макаров И.И. Работоспособн



Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.
Н.Э.Баумана.

Научный консультант - член-корр. АН СССР, проф.,
д.т.н. НИКОЛАЕВ Г.А.

Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР, проф.,
д.т.н. МЕЛЬНИКОВ Н.П.

Заслуженный деятель науки и
техники, проф., д.т.н.
КУДРЯВЦЕВ И.В.

Заслуженный деятель науки и
техники, проф., д.т.н.
БЕЛЕНЯ Е.И.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Защита диссертации состоится " " _____ 1977 г.
на заседании специализированного Совета по технологии и ма-
шинам сварочного производства Московского ордена Ленина и
ордена Трудового Красного Знамени высшего технического учи-
лища им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауман-
ская, 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, про-
сим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 1977 г.

Ученый секретарь Совета
доктор технических наук, профессор

О.И.СТЕКЛОВ

Типография МВТУ. Тираж 100 экз. Дата к печати 7.УП-77г. Л83118
зак. 1109

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

Актуальность. Развитие ответственных областей техники в IX и X пятилетках поставило перед промышленностью задачу сварки прочных сталей и сплавов, элементов больших толщин; обеспечение прочности и надежности конструкций, работающих при переменных нагрузках, низких температурах и других тяжелых условиях нагружения. При выполнении сварочных операций, как и других технологических процессов, полностью избежать появления технологических отклонений в сварных швах (пор, включений, несплавлений и др.) в условиях производства не представляется возможным. Оценка качества выполнения сварных швов по результатам неразрушающего контроля производится по нормативным документам, составление которых должно опираться не только на технологические возможности производства, но и на служебные характеристики (прочность, выносливость) сварных соединений с технологическими отклонениями. Изучение влияния технологических отклонений в сварных швах на возможность возникновения разрушения от них представляет актуальную технологическую и прочностную проблему, над решением которых работают многие исследователи. Отсутствие теоретических предпосылок, связывающих технологические отклонения сварных швов с прочностью конструкции, затрудняет разработку общих методов оценки влияния технологических отклонений на служебные характеристики сварных конструкций.

Настоящая работа является попыткой выработать общий подход к указанной проблеме на основе применения теории концентрации напряжений к анализу напряженного состояния сварных соединений с технологическими отклонениями и на основе обобщения многочисленных экспериментальных данных автора и других исследователей по влиянию технологических отклонений ("дефектов" сварки) на работоспособность сварных конструкций (прочность, выносливость, пластичность) в различных условиях нагружения.

Цель и задачи работы

1. Разработка расчетно-аналитических методов оценки работоспособности сварных соединений с технологическими отклонениями.
2. Формулирование условий возникновения разрушения сварных соединений от технологических отклонений.
3. Получение количественных характеристик (эффективных ко-

эффициентов концентрации) для расчета сварных соединений на прочность.

4. Разработка теоретических предпосылок на основе учета упруго-деформированного состояния сварных соединений для обоснованного назначения допусков технологических отклонений (пор, включений и др.) при составлении нормативных документов для проектирования, изготовления и контроля качества выполнения сварных швов и конструкций.

Методы исследования. Для оценки концентрации напряжений сварных соединений с технологическими отклонениями использованы результаты решения упругих задач о концентрации напряжений Попковича П.Ф., Нейбера Г. и Eiichizo Tsuchida, Tshizo Nakahara в трехмерной постановке, а также плоских задач (Савин Г.Н. и др.), выполненные методом комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили с применением отображающих функций.

Экспериментальные методы включали: оптическое моделирование упруго-деформированного состояния плоских и трехмерных моделей сварных соединений с технологическими отклонениями для решения плоских и объемных задач о концентрации напряжений в сварных швах с плоскими и объемными концентраторами-"дефектами"; применение делительных сеток для исследования полей локальных пластических деформаций в сварных соединениях, исследование прочности сварных соединений с технологическими отклонениями (поры, шлаковые, вольфрамовые и окисные включения, несплавления, непровары, смещение кромок и др.) при однократном (статическом) и многократном (мало- и многоцикловом) нагружении на образцах, моделях, узлах из углеродистых, austenitных сталей и алюминиевых сплавов толщиной 4-30 мм в условиях нормальных, низких и криогенных температур. В качестве критериев предельного состояния разрушения принимались: при статическом нагружении - среднее разрушающее напряжение $\sigma_{ср.р.}$, при многоцикловом - временный предел усталости (σ_r).

Учитывая решающее влияние концентрации напряжений на усталость (σ_r), а в некоторых случаях и на статическую прочность ($\sigma_{ср.р.}$), в качестве основной оценочной характеристики технологических отклонений, имеющих конечный радиус, в работе принят теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_r(K_\sigma)$, который с означ. α_c - для оценки формы сое-

динения (шва); α_2 - для оценки пор, включений и некоторых других отклонений.

Научная новизна работы состоит в новом подходе к изучению проблемы прочности сварных конструкций в части установления условий возникновения разрушения от технологических отклонений (пор, включений, несплавлений), заключающегося в сопоставлении коэффициентов концентрации напряжений, полученных на основе анализа упруго-деформированного состояния сварных соединений для формы шва и выявленных технологических отклонений.

Впервые методом оптического моделирования упруго-деформированного состояния плоских и трехмерных моделей сварных соединений доказана возможность использования результатов решения плоских задач о концентрации напряжений для вычисления объемных коэффициентов концентрации при наличии дискретных технологических отклонений; показано, что объемный характер различных по форме и расположению технологических отклонений оказывает меньшее влияние на концентрацию напряжений, чем плоский и может быть оценен коэффициентом 0,67 ($\alpha_r^o = 0,67 \alpha_r^n$).

Установлено значительное влияние на концентрацию напряжений и работоспособность сварных соединений при многократном нагружении не только формы дискретных технологических отклонений, но и топографии их в сварном шве.

Разработан общий метод определения концентрации напряжений формы стыкового соединения и получена обобщенная формула для инженерного расчета коэффициента концентрации напряжений, учитывающая возможные отклонения, смещение кромок и угловую деформацию; показано, что для всех видов сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, форма шва может оказывать значительно большее влияние на концентрацию напряжений и работоспособность сварных конструкций, чем выявленные "дефекты". На основе анализа распределения локальных пластических деформаций в зонах технологических отклонений показана неэквивалентность влияния концентраторов-дефектов и механических надрезов на работоспособность сварных конструкций: предложен экспериментальный метод оценки чувствительности сварных соединений к технологическим отклонениям, предусматривающий применение в качестве надреза непровар в корне стыкового шва.

Практическая ценность работы состоит в разработке методов расчета коэффициентов концентрации напряжений формы соедине-

ния α_c и "дефектов" α_d для оценки качества выполнения сварных швов при приемочном контроле и для обоснования выбора допусков на технологические отклонения сварных соединений при составлении нормативных документов для проектирования, изготовления и контроля сварных конструкций, в получении эффективных коэффициентов концентрации напряжений сварных соединений с технологическими отклонениями для широкой группы металлов и сплавов (аустенитных, углеродистых, алюминиевых) при нормальной и криогенной (-196°C) температурах.

Внедрение результатов. Практическим выходом работы являются многочисленные нормативные материалы по допустимым отклонениям ("дефектам" и параметрам швов, принятые для производственных организаций отраслевыми (голевыми) институтами промышленных министерств (НИАТ, ВНИИПТМАШ, ЦНИИПСКА, Мосгидросталь).

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из 5 глав с введением и постановкой вопроса, в которых сформулированы цели и задачи исследования, общих выводов и приложения.

В первой главе на основе анализа причин возникновения (по литературным источникам), топографии и формы технологических отклонений (дефектов сварки) в сварных швах дается классификация их с позиции напряженного состояния на плоские и объемные концентраторы напряжений.

Во второй главе излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований концентрации напряжений в упругой области, создаваемой формой сварного шва в соединениях со стыковыми и угловыми (рабочими) швами.

В третьей главе на базе классической теории концентрации напряжений и экспериментального оптического моделирования приводятся результаты исследования упруго-деформированного состояния плоских и трехмерных моделей сварных соединений с дискретными технологическими отклонениями и методика определения объемных теоретических коэффициентов концентрации напряжений.

В четвертой и пятой главах, являющихся экспериментальным подтверждением предложенного нового подхода к изучению проблемы прочности сварных конструкций в части установления условий возникновения разрушения от технологических отклонений ("дефектов сварки") излагаются результаты исследования чувстви-

тельности сварных соединений к плоским и объемным технологическим концентраторам при статических, малоцикловых и многоцикловых нагрузках; приведены эффективные коэффициенты концентрации сварных соединений с технологическими отклонениями при нормальных и криогенных температурах. Диссертационная работа содержит 248 страниц машинописного текста, 20 таблиц и 115 иллюстраций с приложением.

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Под технологическим отклонением сварных соединений (ТОСС) подразумевается нарушение однородности макроструктуры сварного шва в результате возникновения в процессе сварки газовых пор, неметаллических (шлаковых) и металлических (вольфрамовых) включений, окисных пленок, несплавлений (непроваров), трещин,

Как показывают статистические исследования, выполненные по результатам контроля качества сварных швов на изделиях, в среднем до 25% всех проконтролированных объектов содержат отклонения, выходящие за пределы установленных допусков. Отсутствие отклонения от номинала следует рассматривать не как правило, а как исключение.

Существующие нормы на допустимые ТОСС в сварных конструкциях в отраслевых правилах контроля установлены, главным образом, из технологических возможностей применяемых способов сварки, с ссылкой на опыт эксплуатации существующих конструкций. Такое обоснование норм необходимо, но недостаточно, т.к. при этом не учитывается влияние возникающих ТОСС на служебные характеристики материала и сварные соединения (прочность, выносливость, пластичность, вязкость).

Установление норм на допустимые ТОСС только из технологических условий изготовления или контроля приводит или к необоснованному расширению норм, что может привести к снижению технологической дисциплины и опасности разрушения конструкции, или наоборот, к необоснованному ограничению допусков, существенно увеличивающих общую стоимость изготовления изделия и снижение производительности изготовления.

Отсутствие теоретических предпосылок, которые позволили бы связать ТОСС (поры, включения, несплавления), выявляемые по снимку или ультразвуком, с прочностью конструкции объясняется, главным образом, экспериментальными трудностями воспроизведения требуемых технологических отклонений в лабораторных усло-

виях и ограниченными возможностями неразрушающих методов контроля при оценке параметров ТОСС в шве. Это обстоятельство затрудняет как в теоретическом, так и в экспериментальном плане разработку обобщенных критериев оценки влияния ТОСС в сварных швах на служебные характеристики конструкций.

Начало изучения влияния ТОСС на механические свойства сварных соединений в СССР и за рубежом относится к концу 40-х и началу 50-х годов (Николаев Г.А., Назаров С.Т., Макаров И.И., Хемчужников Г.В., Шверницкий В.В.). С конца 50-х и в 60-х годах этой проблеме уделяется большое внимание Британской ассоциацией сварщиков, Центральным институтом в Галле (ГДР). Интенсивно изучается проблема прочности сварных соединений с дефектами японскими исследователями, в США, Франции и др. странах. В этот период в СССР выполнены работы Румянцева С.В., Труфякова В.И., а также аспирантами Емельяновой Т.М., Прохоровым Н.Н. под руководством автора. Несмотря на большое количество выполненных работ по рассмотренной проблеме до настоящего времени не удалось выработать единый подход к оценке ТОСС в сварных конструкциях с позиции прочности по результатам неразрушающего контроля, что сдерживает разработку научно-обоснованных норм по допустимым отклонениям. Накопленный автором данной работы и другими исследователями теоретический и экспериментальный материал по влиянию ТОСС на механические свойства сварных соединений и конструкций создает предпосылки для обобщения и разработки критериев их оценки. Можно представить себе три возможных метода оценки ТОСС: метод прямого эксперимента, метод, использующий аппарат линейной механики разрушения и метод концентрации напряжений и деформаций.

Первый метод, предусматривающий прямое испытание сварных соединений с ТОСС, является основным методом для накопления экспериментальных данных о влиянии ТОСС на механические свойства сварных соединений. Этот метод вследствие неповторяемости однотипных ТОСС по геометрической форме и расположению их в шве не позволяет получить обобщенную оценку прочности соединений с ТОСС. Кроме того для оценки конкретного отклонения требуется выполнить очень большой объем работ.

Второй возможный метод — это оценка влияния ТОСС посредством определения коэффициента интенсивности напряжений K ,

Однако применительно к ТОСС он не дает желаемых результатов, как при статических, так и при динамических условиях нагружения, т.к. острота ТОСС ("дефекта") значительно меньше натуральной трещины. Исключения могут составлять сварочные трещины и в некоторых случаях непровары (несплавления). При статическом нагружении уравнения линейной механики разрушения для вычисления коэффициента интенсивности напряжений K составлены в предположении упругой деформации, что при испытании до разрушения сварных соединений средних толщин (4-30 мм), имеющих ТОСС типа пор, включений, как правило, не реализуется.

В настоящей работе применяется третий метод для обобщенной оценки ТОСС - по коэффициенту концентрации напряжений, который зависит от геометрии отклонения и расположения его в шве.

Метод концентрации напряжений основывается на положении, что при переменных, а для сварных соединений, чувствительных к концентрации напряжений, и при статических нагрузках, разрушение сварных соединений будет возникать от концентраторов, у которых коэффициент концентрации напряжений в упругой области максимальный. При таком подходе все ТОСС (поры, включения и др.), а также форма шва рассматриваются как концентраторы напряжений, поэтому при оценке влияния ТОСС на работоспособность соединения должны быть сопоставлены коэффициенты концентрации ТОСС (α_g) и формы соединения (α_c).

В вопросе о роли формы сварного шва при оценке влияния внутренних и поверхностных ТОСС на механические свойства сварных соединений до настоящего времени нет единого подхода. Как правило, в ТУ и других руководящих материалах по проектированию, изготовлению и контролю сварных швов форма шва не учитывается. Для реализации предложенного подхода необходимо располагать значениями коэффициентов концентрации напряжений для различных ТОСС, коэффициентами концентрации напряжений формы шва и методами оценки чувствительности сварных соединений к ТОСС.

Глава I. ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ

В зависимости от технологического процесса сварки плавлением в сварных швах могут возникать различные виды отклонений. Основными являются: поры, шлаковые макро- и микровключения, пленки окислов, несплавления (непровары), трещины, подрезы,

нарушение заданной геометрии формы шва, смещение кромок, угловая деформация ("домик"), наплывы (налипания).

Первые шесть видов перечисленных ТОСС обычно называют технологическими дефектами, названные в работе технологические отклонения (ТОСС), последние пять — геометрическими дефектами. Термин "дефект" правильнее заменить термином "технологическое отклонение", так как отклонение становится дефектом в случае, если оно выходит за установленные допуски.

В общем случае все ТОСС имеют произвольное расположение по сечению шва и произвольную геометрическую форму. Однако, как показывает анализ топографии ТОСС в сварных швах, каждый вид ТОСС имеет свои специфические особенности, связанные с технологией сварки, материалом и типом соединения. По Никифорову Г.Д., в зависимости от условий образования, поры могут иметь сферическую форму или вид разветвленных каналов и надрывов. Максимальная величина сферических пор 2–3 мм. В титановых сплавах малых толщин по данным Фролова В.В., Третьякова Ф.Е. наиболее распространены сферические поры; при сварке больших толщин — поры удлиненные. Как правило, поры располагаются по линии сплавления, в меньшей степени в верхних участках (подкорковые). Статистика показывает, что диаметр сферических пор в сварных швах титановых сплавов не превышает 0,5–1,0 мм. В углеродистых сталях при сварке в CO_2 поры сопровождаются включениями и не имеют сферической формы. Обычно в этих сталях поры имеют трубчатую (цилиндрическую) или червячную форму без острых окончаний. В сварных соединениях аустенитных сталей поры могут иметь трубчатую (туннельную) форму с округлым окончанием. Шлаковые включения имеют в большинстве случаев неправильную округлую форму радиусом от 0,3 до 5–6 мм, причем размер по длине шва, как правило, больше размера в глубину. Шлаковые включения, как и поры, имеют объемный характер. Окисные пленки в алюминиевых сплавах (АМг-6) представляют собой тонкую плоскую прослойку. Так, по данным Никифорова Г.Д. в АМг-6 толщина окисной пленки может достигать 0,01–0,02 мм. Несплавления (непровары) могут возникать при всех видах сварки. Характерная особенность всех видов несплавления (непроваров) состоит в том, что заканчиваются они в металле шва ответвлениями, имеющими вид трещин, что было впервые выявлено автором и описано в кандидатской диссертации. Ни-
10

рина такого ответвления очень мала (0,01–0,1 мм). В алюминиевых сплавах характер окончания непровара в металле шва мало отличается от формы границ зерен. Основной участок непровара в корне и в середине шва ориентирован в направлении голщины шва; ответвление, как правило, направлено под углом. Протяженность ответвления в направлении толщины шва составляет 5–10% от общей протяженности непровара.

При сварке конструкций угловыми швами без подготовки кромок и с подготовкой кромок с неполным проплавлением зазор между листами следует рассматривать как непровар. Для указанного ТОСС, как и для стыковых швов с непроваром, сохраняется закономерность – от основного направления непровара под углом ответвления участок в виде короткой трещины.

Все рассмотренные ТОСС с позиции напряженного состояния, возникающего при действии внешних сил, автором разделены на 2 группы: плоские и объемные.

К первой группе относятся ТОСС выходящие на поверхность по всей длине шва или на значительной его длине (непровар по всей длине шва, цепочка слившихся пор, выходящая на поверхность, сквозные непровары в середине шва). Ко второй группе относятся все дискретные ТОСС (единичные поры, отдельные короткие цепочки или скопления слившихся и неслившихся пор, местные несплавления внутри шва). Ко второй группе могут быть отнесены также технологические отклонения, выходящие на поверхность, но имеющие небольшую протяженность ($l \leq 3d$) (единичные поры, шлаковые включения, скопления и цепочки слившихся пор). Такое разделение основано на различии в методах теоретического и экспериментального решения задачи о распределении напряжений в зонах ТОСС. Для ТОСС первой группы распределение напряжений теоретически и экспериментально получено решением плоской задачи теории упругости. Для оценки напряженного состояния, создаваемого технологическими отклонениями второй группы решены трехмерные задачи. Наибольший интерес представляют ТОСС второй группы, т.к. все существующие физические методы контроля качества сварных швов без разрушения направлены на выявление ТОСС, находящихся внутри шва.

В работе все ТОСС рассматриваются как естественные надрезы (концентраторы), поэтому при анализе напряженного состояния сварных соединений и при оценке влияния отклонений на

работоспособность конструкций особенно при вибрационных нагрузках за основу принято учение о концентрации напряжений. Как известно в основе учения о концентрации напряжений лежит закон затухания, который выражается в том, что, чем больше максимальное напряжение в основании концентратора, тем резче затухают напряжения при удалении от наиболее напряженной зоны. Закон затухания проявляется особенно резко в случае пространственного и напряженного состояния. Максимальное напряжение в концентраторе зависит в основном от той части поверхности концентратора, которая находится в высоко-напряженной области. Форма концентратора (ТОСС) на достаточном удалении от высоко-напряженной зоны не оказывает существенного влияния на величину максимального напряжения в окрестности концентратора. На этом основании все разнообразие форм ТОСС можно схематизировать несколькими основными формами выточек: 1) газовые сферические поры, выходящие и не выходящие на поверхность — сферическими выточками; 2) шлаковые включения, газовые не сферические поры, мелкие несплавления, непровары и окисные пленки в углеродистых сталях, не выходящие на поверхность — выточками в виде эллипсоидов вращения и сфероидов; 3) глубокие протяженные непровары в корне шва при односторонней сварке — выточками в виде гипербол. Принятые модели позволили применить для определения коэффициентов концентрации напряжений теорию концентрации в плоской и пространственной постановке. Учение о концентрации в упругой области при наличии различного рода выточек, особенно в плоской задаче, теоретически разработано достаточно глубоко (Мухомедов Н.Н., Нейбер Г., Савин Г.Н. и др.), однако, в объемной постановке количество таких решений крайне ограничено. В настоящей работе ставилась задача не разработки новой теории концентрации напряжений для ТОСС, а применение имеющихся принципиальных решений для оценки напряженного состояния сварных соединений с различными объемными и плоскими концентраторами — "дефектами".

Глава 2. КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЫКОВЫХ ШВАХ

Многочисленными экспериментами показано, что разрушение качественных стыковых швов при переменных нагрузках происходит как правило с поверхности по границе сварного шва и основного металла, особенно в условиях низких и криогенных температур. В зависимости от способа и технологии сварки, типа соединения

толщины свариваемых листов, форма шва будет различная и, следовательно, будет различная величина концентрации напряжений, которая может превзойти концентрацию напряжений от внутренних ТОСС (пор, включений). Таким образом, задача состоит в достоверном определении величины коэффициента концентрации напряжений вызванной формой соединения.

Существует несколько методов определения концентрации напряжений. Навроцким Д.И. предложено теоретический коэффициент концентрации напряжений стыкового шва определять по формуле, полученной из упрощенного представления стыкового шва в виде прямоугольного выступа. Формула справедлива при отношении высоты шва к ширине $< 0,35$. Формула Кархина-Копельмана позволяет дополнительно учитывать возможные подрезы по границе шва. Широкое распространение среди исследователей (Бельчук Г.А., Труфяков В.И., автор), вследствие простоты, получил расчет теоретического коэффициента концентрации напряжений стыкового шва, использующий аналитическое решение плоской задачи Нейбера Г. о растяжении полубесконечной пластины с небольшим фигурным выступом, в котором основными расчетными параметрами являются радиус перехода и ширина (высота) выступа.

Все перечисленные методы расчета учитывают концентрацию напряжений только от формы усиления шва (проплава) и не позволяют оценить влияние возможных технологических отклонений — смещение осей стыкуемых кромок и угловую деформацию, возникающую от усадки шва. Кроме того с увеличением ширины (высоты) шва при $\tau = \text{const}$ в указанных методах расчета концентрация напряжений непрерывно увеличивается (рис. 1), что экспериментально не подтверждается. Автором разработан новый метод расчета и получена обобщенная формула для коэффициента концентрации напряжений формы сварного соединения $\alpha_c = \alpha_{\text{кр}} \cdot \alpha_{\text{см}} \cdot \alpha_{\text{дг}}$ (1), где $\alpha_{\text{кр}}$, $\alpha_{\text{см}}$, $\alpha_{\text{дг}}$ — коэффициенты концентрации напряжений соответственно формы шва, смещения кромок и от угловой деформации. Метод определения $\alpha_{\text{кр}}$ базируется на зависимости Нейбера Г. (рис. 1) и теории прерывистых связей Шиманского Ю.А., позволившей ввести поправку η на ширину шва в зависимости от жесткости соединения $\eta = f(\frac{h}{b}, m)$ (2), где $m = \frac{a}{b}$ (3) $a = \sqrt{\frac{H+h}{h^2 H}}$ (4), b — полуширина выступа (рис. 2). Показа-

но, что для соединений с параметром $m > 4$ ширина шва не оказывает влияния на величину коэффициента концентрации напряжений α_φ . В этом случае величина " b " должна быть заменена на расчетную " b_p " из выражения (3), положив $m = 4$; при $m = 4$ значение α_φ , полученное по зависимости (рис. 1а) должно быть уменьшено на величину η (рис. 2). При $\frac{b}{\delta} < 10$ параметр m следует принимать 1,5. Без корректировки зависимостью Нейбера Γ можно пользоваться только при $m = 3-4$. Справедливость предложенного метода расчета α_φ подтверждена экспериментальными данными, полученными на оптических моделях, а также экспериментальными данными других исследователей (Навроцкого Д.И., Труфякова В.И., Турнова Г.П. и др.). В работе приводятся численные примеры расчета α_φ , поясняющие методику расчета.

Второй коэффициент в формуле (I) — α_{cm} , учитывает повышение напряжений по границе шва от изгиба при смещении осей стыкуемых деталей, что, как правило, имеет место в сварных соединениях. Этот коэффициент получен исходя из модели стыкового соединения с абсолютно жестким швом в виде стержня конечной длины с ломаной осью и нагруженного растягивающими усилиями. Указанная модель была ранее применена Сагалевичем В.М. для определения напряжений в нахлесточных соединениях, выполненных точечной сваркой. Экспериментальная проверка на оптических моделях и тензометрированием показала, что формула $\alpha_{cm} = 1 + 3E$ (5), где E — относительное смещение кромок, хорошо соответствует эксперименту. Показано, что формула (5) может быть применена и для оценки концентрации напряжений в конструкциях, находящихся в условиях 2-х осного нагружения. Величина α_{cm} , как это видно из формулы (5), зависит, главным образом, от относительного смещения и мало зависит от материала, длины стержня и величины нагрузки.

Третий коэффициент в формуле (I) $\alpha_\gamma = 1 + 6 \frac{C}{H}$ (6), где C — опускание шва, H — высота стержня, учитывающий повышение напряжений у границы перехода от шва к основному металлу за счет изгиба от угловых деформаций стыкуемых кромок, получен элементарным решением задачи о косом изгибе прямоугольного бруса. Расчет коэффициентов концентрации напряжений α_c по обобщенной формуле (I) не представляет затруднений. Для

измерения радиуса перехода от шва к основному металлу γ (рис. 2) автором, совместно с Гирш В.И., разработан метод слепков, который может быть применен для измерения радиусов и не сварных соединений (деталей). Расчеты K_c по формуле (I) показали, что величина коэффициента концентрации напряжений стыкового соединения может быть достаточно высокой и соизмеримой с концентрацией в угловых (лобовых) швах. Показано, что формула (I) может быть применена и для расчета коэффициентов концентрации в лобовых (угловых) швах, т.к. основное влияние на величину концентрации напряжений в соединениях с лобовыми (угловыми) швами оказывает не соотношение катетов, а как и в стыковых швах, геометрия границы перехода по подшове шва от основного к наплавленному металлу. Установлено, что силовой поток концентрируется у непровара в основании углового шва (галтели). В результате взаимодействия полей напряжений от галтели и непровара при повторно-статических нагрузках происходит возникновение и распространение разрушения по подшове шва. Сформулированная схема процесса возникновения и распространения разрушений лобовых (угловых) швов с неполным проплавлением подтверждена в работе прямыми экспериментами при осевом малоцикловом растяжении на сварных соединениях с лобовыми швами из низкоуглеродистой и низколегированной стали (ЮХСНД) толщиной 30 мм, у которых прочность наплавленного металла была больше прочности основного металла.

Результаты испытания на осевое малоцикловое растяжение соединений с лобовыми швами показали, что существующие методы расчета лобовых швов по предельному состоянию наступления текучести, не учитывающие фактического различия в механических свойствах швов и основного металла, приводят к завышенным катетам угловых швов и, как следствие, к существенному увеличению объема наплавленного металла. Предлагается повысить допускаемое напряжение (расчетные сопротивления) при расчете угловых (лобовых) швов на срез для конструкций, работающих в условиях малоциклового нагружения на величину $\sigma = \frac{\sigma_s}{\sigma_b}$, где σ_s и σ_b пределы прочности наплавленного и основного металла. Как показали расчеты, в системе ВНИИПТМаш экономия в весе наплавленного металла составит не менее 16%.

Глава 3. КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ (ПОРАМИ, ВКЛЮЧЕНИЯМИ, НЕСПЛАВЛЕНИЯМИ)

В соответствии с принятой классификацией ТОСС в сварных соединениях на плоские и объемные, дискретные газовые поры и шлаковые включения отнесены к объемным отклонениям, так как для них требуется решение объемной задачи, как при теоретическом, так и экспериментальном методах исследования напряженного состояния. В виду ограниченных возможностей математического аппарата теории концентрации напряжений для решения подобных объемных задач не разработана. В пространственной постановке теории концентрации напряжения разработана только для единичных выточек. К числу таких задач, которые были использованы в работе, относятся задачи о мелкой внутренней выточке в виде сферы или эллипсоида центрально расположенных в теле вращения (Нейбер Г.) и о единичной сферической выточке в полубесконечном теле (*Tsuchida, Naganaga*). Результаты решения этих задач применены для оценки концентрации напряжений единичных сферических газовых пор в сварном шве, а решение задачи об эллипсоидной выточке — для единичных несплавлений (непровар в центре шва небольшой величины, продолговатые шлаковые включения).

На практике наиболее часто в сварных швах встречаются не единичные, а групповые ТОСС в виде различно расположенных цепочек из 2-х и более пор, включений и скоплений.

Так как теоретических и экспериментальных решений в пространственной постановке для перечисленных сочетаний выточек в теории концентрации не существует, в настоящей работе для определения коэффициентов концентрации напряжений в сварных швах применен метод, сочетающий использование указанных объемных задач для единичных выточек и ряда плоских задач о концентрации напряжений около отверстий, теория которых разработана многими исследователями и подробно описана в монографии Савина Г.Н.

За основу принимается результат решения задачи о сферической и эллипсоидной единичных выточках, коэффициент концентрации напряжений которых при о.е.в.м. растяжении принят за теоретический коэффициент концентрации единичной сферической поры и удлиненного газового или шлакового единичного включения соответ-

М328816

венно. Известно, что коэффициент концентрации напряжений в пластине с круглым отверстием при растяжении $\alpha_r^n = 3,0$, а в теле со сферической выточкой $\alpha_r^o = 2,04-2,06$. Анализ показал, что это соотношение между плоским и объемным концентратором напряжений $\alpha_r^o = 0,67 \alpha_r^n$ (6) сохраняется и для другой формы единичных концентраторов - эллиптического отверстия в пластине и эллипсоидной выточки в теле. Было предположено, что указанное соотношение сохраняется и для других (не единичных) сочетаний подобных плоских и объемных концентраторов. Это положение в работе подтверждено экспериментально решением трехмерных задач на оптических объемных моделях методом "замораживания" деформаций. Эксперименты выполнены с участием аспирантов Прохорова Н.Н. и Лудука О.А. в лаборатории оптических методов исследований МИСИ им. Куйбышева при консультации к.т.н. Завалишина С.И.

Получено распределение напряжений и коэффициенты концентрации напряжений следующих трехмерных задач. Сферическая единичная пора в сварном шве, полусферическая единичная пора, выходящая на поверхность, две сферические поры радиуса R на расстоянии друг от друга $\frac{R}{3}$ (рис. 3а), две сферические поры на расстоянии от поверхности $2R$ (рис. 3б), две сферические поры на расстоянии от поверхности равном R (рис. 3в), цепочки из 3-х сферических пор на расстоянии друг от друга равном R (рис. 4а), цепочка из 2-х неодинаковых полостей - сферической и цилиндрической (рис. 4б). Анализ теоретических решений задач о концентрации напряжений в пластинах с отверстиями (Савин Г.Н., Устинов Ю.А., Уфлянд Я.С. и др.) и перечисленных объемных задач показал, что решения плоских задач могут быть использованы для определения объемных коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях с порами и включениями с учетом полученного соотношения $\alpha_r^o = 0,67 \alpha_r^n$. В частности, для цепочек сферических пор и включений справедливы зависимости на рис. 5. Показано, что на величину коэффициента концентрации напряжений оказывают влияние взаимное расположение и расстояние объемных концентраторов от поверхности: $\alpha_r^o = \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{\epsilon}$, где $\epsilon = \frac{h_1}{R}$, h_1 - расстояние от поверхности, R - радиус концентратора. Внутренних сторон концентраторов имеет место повышение среднего уровня напряжений; с внешней стороны общий уровень и

концентрация напряжений не увеличиваются, чем и объясняется возникновение разрушений (трещин) с внутренней стороны цепочек пор и включений. При расположении включений друг от друга и от поверхности равно или больше $3d$ (d - диаметр) ТОСС следует рассматривать как единичные, что в настоящее время записано в большинстве отраслевых нормативов по контролю качества сварных швов. На величину коэффициента концентрации оказывают влияние соотношение между размерами включений и эксцентриситет в приложении и трузок.

В работе приводятся зависимости, позволяющие определить коэффициенты концентрации напряжений и других комбинаций дискретных ТОСС в сварных швах. В работе дано решение задачи о концентрации напряжений в сварных швах с глубоким непроваром в корне шва при растяжении, полученное автором и Николаевым Г.А. суперпозицией решений в криволинейных координатах нескольких частных задач Нейбера Г. Расчет коэффициента концентрации напряжений по приведенным в работе формулам показал, что для непроваров, полученные значения не могут иметь место в действительности, т.к. при сильно искривленных выточках напряжения даже на грани одного или группы кристаллов $\sigma \neq \text{Const}$. Показано, что при всех методах расчета коэффициенты концентрации напряжений от непровара всегда будут больше, чем от других ТОСС (кроме трещин). Для оценки степени опасности непровара в сварных конструкциях целесообразно использовать аппарат линейной механики разрушения. В этом направлении фундаментальные работы проводятся в МВТУ им. Баумана (Винокуров В.А., Куркин С.А.), а также Работновым Ю.Н. с сотрудниками.

Глава 4. СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ

Сформулированное в разделе "Постановка вопроса" положение по оценке работоспособности сварных соединений методом сопоставления упругих коэффициентов концентрации напряжений α_c и α_g служит целям предварительной разбраковки сварных швов, т.е. решает вопрос - следует ли при данной форме шва опасаться снижения прочности от ТОСС, выявленных неразрушающими методами контроля. О степени влияния указанных ТОСС на работоспособность соединений сопоставление α_c и α_g ответа не дает. Количест-

венная оценка работоспособности сварных соединений (чувствительность к "дефекту") должна определяться по результатам соответствующих испытаний сварных соединений. В работе дан анализ существующих методов определения чувствительности материалов к надрезу и показано, что применение механического надреза для оценки чувствительности сварных соединений к ТОСС не выявляет действительные свойства сварного соединения в зоне ТОСС и может привести к неправильной оценке.

Оценку чувствительности сварных соединений к ТОСС автором предлагается осуществлять по результатам испытания на осевое растяжение плоских стыковых образцов со снятым усилением с непроваром в корне или в середине шва, а за критерий чувствительности принимать отклонение от пропорциональной зависимости предела прочности соединения с увеличением глубины непровара (рис. 6, кривые 1,2). Правомерность указанной методики подтверждена исследованиями локальной пластичности методом делительных сеток на сварных соединениях с непроваром из низкоуглеродистой, аустенитной, низколегированной сталей и алюминиевых сплавов (АМг-6, Д16Т). Показано, что локальная пластичность в зоне непровара снижается в 1,5 - 2 раза по сравнению с основным металлом и металлом шва без дефекта, а объем зоны пластической деформации в 5 - 6 раз, что значительно больше, чем при соответствующем механическом надрезе. По указанной методике оценена чувствительность сварных соединений различных металлов и сплавов толщиной до 30 мм (рис. 6). Результаты показали, что степень чувствительности сварных соединений к ТОСС определяется, главным образом, свойствами металла шва и в меньшей степени свойствами основного металла. Чувствительными к ТОСС при статических нагрузках и нормальной температуре являются соединения, у которых в соответствии с представлениями, развиваемыми Бахши О.А., металл шва является мягкой прослойкой. Сварные соединения со швом равной или большей прочности, чем основной металл по данной методике не чувствительны к дефектам при статических нагрузках. В таких швах все ТОСС (непровары, включения, поры, окисные пленки) должны рассматриваться не как концентраторы напряжений, а как фактор уменьшения рабочего сечения (с учетом прочности металла шва). Для сварных соединений, чувствительных к ТОСС можно, применив метод сопоставления уп-

ругих коэффициентов концентрации напряжений α_c и α_g (глава 2, 3), установить какой из концентраторов будет определять прочность сварного узла.

При $\alpha_c > \alpha_g$ прочность соединения будет определяться формой соединения. И наоборот - при $\alpha_g > \alpha_c$ работоспособность соединения будет определяться выявленным дефектом. В последнем случае допустимость ТОСС в конструкции должна определяться степенью снижения прочностных свойств по экспериментальным данным. Правомерность такого подхода подтверждена в работе результатами испытаний на образцах, сварных узлах и моделях сварных соединений (стыков труб из низкоуглеродистой стали толщиной 6 и 9 мм, диаметром 144-152 мм, шар-баллонов из АМг-6 с толщиной стенки 2 и 4 мм, диаметром 300 мм), а также экспериментальными данными Британской ассоциации сварщиков, Центрального института сварки в Галле (ГДР), японскими исследователями (Кихара, Ишим и др.). Анализируя результаты оценки чувствительности сварных соединений к непровару (рис. 6), необходимо отметить, что они не противоречат подходу с позиции линейной механики разрушения по критерию K_{Ic} , который, как известно, определяется на крупногабаритных образцах в условиях плоской деформации. В работе исследования проводились на сварных соединениях толщиной 4-30 мм с относительно невысокой прочностью, для которых условия плоской деформации явно не соблюдались, поэтому сопоставление по критерию K_{Ic} в данном случае недостаточно правомерно. Прямые эксперименты установлено, что снижение прочности сварных соединений, чувствительных к концентрации напряжений, у которых усиление шва и проплав не обработаны, при статических нагрузках зависит от величины коэффициента концентрации напряжений формы шва (рис. 7). Величина коэффициента концентрации α_p , зависящая от технологии сварки, может изменяться в широких пределах, даже при оптимальных режимах сварки. Влияние концентрации напряжений на статическую прочность существенно увеличивается при смещении осей стыкуемых элементов, что подтверждено испытанием на конструктивную прочность по методике Куркина С.А. на сварных стыках АМг-6 толщиной 16 мм, а также работами Лукьянова В.Ф. на толщинах 50 мм. Показано, что на снижение конструктивной прочности основное влияние оказывают относительное величина смещения

кромок и острота перехода от наплавленного к основному металлу. В соответствии с полученными результатами снижение прочности сварных соединений от формы усиления шва при статических нагрузках и нормальных температурах имеет место также в сварных соединениях низколегированных сталей (30ХГСНА, 23Х2НВФА), а при низких температурах — для большинства сталей и сплавов.

Исследование работоспособности сварных соединений с порами и включениями на образцах и моделях конструкций показало, что снижение прочности от указанных технологических отклонений при наличии усиления шва и проплава происходит только в том случае, если $\alpha_g > \alpha_c$, что обычно имеет место для цепочек слившихся пор, включений с надрывами. Влияние пор, включений на прочность чувствительных к концентрации напряжений сварных соединений, проявляется в полной мере при отсутствии усиления шва и проплава. В сварных соединениях, не чувствительных к концентрации напряжений, поры, включения, уменьшающие рабочее сечение шва на 5–7%, статическую прочность не снижают; при увеличении площади дефекта прочность снижается пропорционально уменьшению сечения шва. Полученные автором результаты подтверждаются работами *Haggisom I*, Куркина С.А. и др. исследователей. Установлено, что в условиях криогенных температур сварные соединения аустенитной метастабильной стали 12Х18Н10Т обладают повышенной чувствительностью к ТОСС, при этом возможность разрушения соединений от объемных концентраторов (пор, включений) будет определяться общей закономерностью, т.е. при соблюдении соотношения $\alpha_g > \alpha_c$.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

При изучении влияния ТОСС на усталостную прочность сварных соединений, также как и при статических нагрузках, ставилась задача обосновать правомерность применения метода концентрации напряжений для оценки работоспособности сварных конструкций и получить эффективные коэффициенты концентрации сварных соединений с отклонениями для расчета сварных конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок. В работе изучено влияние ТОСС главным образом при многоцикловом нагружении. Показано, что оценка сварных конструкций по долговечности

ти, т.е. по числу циклов до разрушения при $G = \text{const}$, применяемая некоторыми исследователями, может привести к ошибочным выводам (разброс опытных данных по долговечности один - два порядка). Исследование усталостной прочности выполнено на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения при частоте изменения напряжений от 300 до 2880 ц/мин на образцах толщиной 4-30 мм при осесимметричном растяжении и чистом изгибе, а также на сварных узлах (трубы, шар-баллоны) в условиях плосконапряженного состояния. Основные испытания выполнены при асимметрии цикла нагружения $R = 0,1-0,3$, т.е. в условиях, когда влияние остаточных напряжений, как показано Труфяковым В.И., не оказывает существенного влияния на усталостную прочность. Результаты испытаний обрабатывались статистическим методом, обычно применяемым для величин, имеющих между собой корреляционную связь. Теснота корреляционной связи оценивалась коэффициентом корреляции. Исследование чувствительности сварных соединений к непровару показало, что установленное ранее автором на стыковых соединениях низкоуглеродистой стали значительное снижение предела усталости соединения (G_z) от непровара небольшой глубины (до 8% от толщины) справедливо и для других сталей и сплавов (рис. 8). Это находится в полном соответствии с результатами макро- и микроанализа (глава I), которые показали, что непровар во всех случаях оканчивается небольшим ответвлением типа трещины, т.е. имеет одинаковую остроту. Сделано предположение, что должна существовать некоторая критическая величина радиуса концентратора, меньше которой концентрация напряжений и эффективные коэффициенты концентрации остаются постоянными. Такой критической величиной может быть размер зерна или нескольких зерен. Гипотеза о существовании предельного значения коэффициента концентрации находит подтверждение в работах других авторов (Kawasaki, Signes, Burdick, Harrison и др.).

Установлено, что сварные соединения высокопластичных метастабильных аустенитных сталей не чувствительны при нормальных температурах к ТОСС, при статических нагрузках (рис. 6), при переменных нагрузках обладают повышенной чувствительностью (рис. 8). Для исследованных в работе сварных соединений (рис. 8) величина G_z при наличии острого концентратора (непровара) мало зависит от свойств основного металла. Отсутствие сущест-

венного влияния свойств основного материала на σ_2 сварных соединений с концентраторами экспериментально показано Труфяковым В.И. на стыковых соединениях низкоуглеродистой и низколегированной сталях с усилением шва. Анализ экспертизных материалов по установлению причин аварий сварных криогенных конструкций из стали I2XI8NIOT показал, что основными причинами разрушений являлись конструктивные дефекты и концентрация, вызванная формой усиления шва (проплава). Влиянию конструктивных форм сварных металлических конструкций на работоспособность конструкций посвящены фундаментальные исследования ЦНИИПСК (Мельников Н.П.), ЦНИИ МПС (Большаков К.П.), ИЭС им. Патона (Труфяков В.И.), ЦНИИТМАШ (Кудрявцев И.В.) и др.

В диссертационной работе изучено влияние формы усиления шва и формы проплава на усталость. Исследование автора и анализ результатов работ по усталостной прочности стыковых соединений с усилением шва Кудрявцева Н.В., Навроцкого Д.И., Труфякова В.И., *Dinsdale, Newman, Neuman, Kichaga* и др.) показали, что нормативные величины эффективных коэффициентов концентрации стыковых швов $K_2 = 1,4 - 1,8$ для низкоуглеродистых и низколегированных сталей существенно отличаются от действительных ($K_2 = 1,2 - 2,75$). При наличии смещения кромок усталостная прочность дополнительно снижается на 10-60% (рис.9). Степень снижения усталостной прочности стыковых соединений от смещения кромок может быть приближенно оценена (по сравнению с соединениями без смещения) по формуле $\sigma_2^c = \frac{\sigma_2}{\alpha_{cm}}$, где σ_2^c - пределы усталости соединений со смещением и без смещения кромок соответственно, $\alpha_{cm} = 1 + 3\varepsilon$, ε - относительное смещение. Полученные результаты показали, что существующее мнение о стыковых швах, как о соединениях с наименьшей концентрацией напряжений и наибольшей усталостной прочностью справедливо только для швов с очень плавным переходом от шва к основному металлу и при отсутствии смещения кромок и угловой деформации. В подавляющем большинстве случаев плавный переход по всей длине шва отсутствует, поэтому при расчете коэффициента концентрации напряжений по формуле $\alpha_c = \alpha_f \cdot \alpha_{cm} \cdot \alpha_\gamma$ необходимо учитывать минимальный радиус границы перехода от шва к основному металлу. Высокие коэффициенты концентрации напряжений

стыковых швов (α_c) и пластифицирующий эффект поверхностного слоя, установленный Давиденковым Н.Н., Одинговым И.А., Ивановой В.С. позволяют рассматривать стыковые швы с усилением и проплавом как концентраторы, степень влияния которых на прочность может быть в большинстве случаев значительно больше, чем влияние пор, включений и даже несплавлений. Влияние пористости на усталость изучалось многими исследователями, как сопутствующий фактор (*Gurney, Hempel, Kischka, Munse, Nitzlich, Haggison*, Труфяков В.И. и др.), при этом за оценочную характеристику пористости принималась площадь ослабления сечения порами, а в некоторых случаях пористость оценивалась качественно. Автором показано, что оценка пористости по площади не коррелируется с усталостной прочностью соединений с порами и шлаковыми включениями. Усталостная прочность соединений с порами зависит от топографии пористости в сечении шва, что, как показано в главе 3, характеризуется коэффициентом концентрации напряжений α_g . Пory и включения являются источниками возникновения разрушений только в том случае, если коэффициент концентрации напряжений $\alpha_g > \alpha_c$ (рис. 10)..

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретическими и экспериментальными исследованиями работоспособности сварных соединений с технологическими отклонениями (ТОСС) при статических и переменных нагрузках установлена необходимость нового подхода к оценке допустимости ТОСС на основе учета влияния концентрации от формы соединений на несущую способность конструкций и в связи с этим осуществление корректировки существующих нормативов по допустимым ТОСС ("дефектам") в сварных соединениях.

2. Для сварных соединений, чувствительных к концентрации напряжений, установлено, что концентрация, вызванная формой шва, может оказывать на работоспособность сварных соединений более сильное влияние, чем внутренние технологические отклонения. На этом основании предложено оценку допустимости оставления ТОСС в сварных швах производить методом сопоставления упругих коэффициентов концентрации напряжений от формы сварного соединения (шва) α_c и от внутренних технологических отклонений - α_g . Если по результатам неразрушающего контроля величина коэффициента концентрации напряжений, выявленного ТОСС,

рассчитанная по методике автора, $\alpha_g < \alpha_c$, то работоспособность конструкции будет определяться формой шва (соединения); в этом случае ТОСС не является дефектом конструкции. Степень снижения работоспособности конструкции при $\alpha_g \geq \alpha_c$, если это необходимо, должна оцениваться по экспериментальным данным, полученным автором и другими исследователями при соответствующих испытаниях.

3. Для определения коэффициентов концентрации напряжений формы соединения (α_c) теоретически получена и экспериментально проверена для стыковых швов обобщенная формула, позволяющая в отличие от существующих методов расчета, учитывать все параметры соединения (форму шва, жесткость), а также возможные технологические отклонения (смещение кромок, угловую деформацию).

4. Теоретический и экспериментальный анализ напряженного упруго-деформированного состояния объемных и плоских моделей сварных соединений с концентраторами позволил классифицировать все технологические отклонения в сварных швах по напряженному состоянию на две группы: плоские и объемные, требующие соответственно решения плоской и объемной задач теории концентрации напряжений. Установлено, что учет объемности напряженного состояния от внутренних дискретных технологических отклонений приводит к уменьшению коэффициента концентрации напряжений в 1,5 раза по сравнению с плоским концентратором. Это соотношение сохраняется постоянным для разных сочетаний подобных по форме плоских и объемных концентраторов (цепочки, скопления пор, включений), что позволяет при определении коэффициентов концентрации напряжений объемных технологических отклонений, для которых нет теоретических и экспериментальных решений, использовать соответствующие результаты решения плоских задач теории концентрации напряжений.

5. Экспериментально установлено, что такие концентраторы, как непровары, по сравнению с подобными по форме и размеру механическими надрезами создают более высокую локализацию пластических деформаций и в большей степени снижают предельную величину локального запаса пластичности. На этом основании предложен экспериментальный метод оценки чувствительности сварных соединений к технологическим отклонениям, основанный на применении в качестве концентратора непровара в корне или в

середине шва.

6. По данной методике чувствительными к непровару при статических нагрузках являются сварные соединения, у которых шов — мягкая прослойка. В указанных соединениях технологические отклонения должны рассматриваться как фактор концентрации напряжений. В сварных соединениях не чувствительных к непровару (шов — твердая прослойка) технологические отклонения являются только фактором уменьшения сечения. С этих позиций целесообразно изготавливать конструкции со сварными швами равной или несколько большей прочности, чем основной металл.

7. Показано, что при вибрационных нагрузках объемные технологические отклонения (поры, шлаковые включения округлой формы) усталостную прочность сварных соединений не снижают, если $\alpha_c > \alpha_g$. Снижение усталостной прочности от объемных технологических отклонений происходит в том случае, если коэффициент концентрации $\alpha_c = 1$ или $\alpha_g > \alpha_c$; в последнем случае это соответствует порам с надрывами или с окисными и шлаковыми включениями типа несплавлений. Вольфрамовые включения статическую и усталостную прочность не снижают, если они не сопровождаются окисными пленками.

8. Существенно изменена точка зрения ¹о взаимосвязи влияния свойств материала и несущей способности сварных соединений с концентраторами (технологическими отклонениями) при различных условиях нагружения; показано, что сварные соединения высокопластичных метастабильных аустенитных сталей, не чувствительные при $+20^{\circ}\text{C}$ к концентраторам при статических нагрузках обладают повышенной чувствительностью при вибрационных и статических (-196°C) нагрузках.

9. В соответствии с полученной обобщенной формулой теоретического коэффициента концентрации напряжений стыкового шва наибольшее влияние на снижение усталостной прочности соединений оказывает смещение кромок и угловая деформация. Для оценки влияния смещения кромок предложена приближенная зависимость, позволяющая с ошибкой 10–15% определять предел усталости стыковых соединений со смещением кромок различных материалов для толщин 4–30 мм.

10. Анализ напряженно-деформированного состояния и харак-

тера разрушения рабочих угловых швов тавровых соединений углеродистых и низколегированных сталей толщиной 20–30 мм показал, что основным фактором, определяющим прочность соединений при переменных нагрузках является концентрация напряжений у границы перехода от наплавленного металла к основному по подошве шва, что не учитывается в существующем методе расчета на основе "клина". Предлагается теоретический коэффициент концентрации лобового шва определять по формуле, полученной автором для стыкового шва, с учетом корректировки высоты шва по экспериментальной зависимости.

II. Исследование прочности и характера статического и повторно-статического разрушения лобовых швов углеродистой, низколегированной стали толщиной 20–30 мм, сваренных качественным электродом, автоматической в CO_2 и под флюсом, показал, что существующий метод учета технологии сварки при расчете по допускаемым напряжениям угловых швов на срез введением коэффициента 0,6–0,65 дает завышенное значение катетов углового шва. Предлагается допускаемое напряжение устанавливать с учетом проплавления основного металла и с учетом прочности наплавленного металла по предложенной в работе формуле $[\sigma]' = 0,7 \sqrt{b} [\sigma]_p$, где $b = \frac{b_1}{b_2}$.

12. Результаты работы, полученные в виде эффективных коэффициентов концентрации сварных соединений с различными технологическими отклонениями и предложения по параметрам угловых швов внедрены: на предприятиях ЦНИИПСК в ТУ на изготовление металлоконструкций АЭС, при проектировании затворов для Ингури ГЭС в Мосгидростали (Министерство энергетики и электрификации СССР), в РТМ научно-производственного объединения Криогенмаш в виде коэффициентов прочности сварных швов алюминиевых сплавов, углеродистых и аустенитных сталей в РТМ 2082-II-74, РТМ 2082-I2-74, в инструкции И-НМ-3 (Ш и зд). По рекомендации Всесоюзного семинара отрасли по неразрушающим методам контроля (Москва, 1971, НИАТ, ВДНХ "Атомная энергия") используются в авиационной промышленности при оценке качества сварных швов. По реше-

нию НТС ВНИИПТМАШ (март, 1976) результаты работы рекомендованы для внесения в РТМ на проектирование и изготовление крановых металлических конструкций. Материалы диссертации излагаются в курсе "Сварные конструкции", некоторые результаты введены в учебные пособия.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Макаров И.И. "Дефекты сварки и прочность", гл. УП "Проектирование сварных конструкций в машиностроении". Библиотека конструктора, под ред. Куркина С.А., изд.Машиностроение, 1975, стр. 152-171.
2. Макаров И.И. Влияние пористости на прочность стыковых соединений. "Сварочное производство", 1972, № 6, с. 27-29.
3. Макаров И.И. Оценка влияния дефектов сварки на механические свойства сварных соединений. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. г.Челябинск, Центральное и областное НТО, Стройиндустрия, 1973, с. 153-158.
4. Макаров И.И. Методика расчета коэффициента концентрации напряжений сварных соединений стыковых швов. "Сварочное производство", 1977, № 4, с. 5-7.
5. Макаров И.И. Критерии оценки технологических отклонений в сварных конструкциях. "Сварочное производство", 1975, № 12.
6. Макаров И.И. Прочность сварных соединений стали ЭИ-659 при переменных нагрузках. "Сварочное производство", 1960, № 11.
7. Николаев Г.А., Макаров И.И. Влияние качества сварки на механические свойства сварных соединений. "Вопросы прочности и технологии сварки", Сб. статей под ред. Николаева Г.А., Труды МВТУ им. Баумана, № 37, Машгиз, 1955.
8. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Прочность и пластичность сварных соединений со смещением кромок. В сб. "Материалы по металлическим конструкциям", М., Стройиздат, 1970, вып. 15, с.36-47.
9. Макаров И.И., Волынский В.Н., Прохоров Н.Н., Шиганов Н.В., Попов О.Н., Самко И.Ф. Прочность сварных стыковых соединений АМг-6 с технологическими отклонениями при криогенных температурах. В сб. "Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций" под ред. Винокурова В.А., 1974, №182, с. 3-14.

10. Макаров И.И., Волинский В.Н., Лудук О.А. Методика проведения статических и усталостных испытаний крупногабаритных образцов при криогенных температурах. "Известия вузов. Машиностроение", 1975, № 10 (МВТУ).
11. Макаров И.И., Грудзинский Б.В. Влияние непровара на статическую прочность при криогенных температурах. "Сварочное производство", 1976, № 1.
12. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Влияние технологических дефектов на долговечность и надежность сварных соединений. В сб. "Надежность сварных соединений и конструкций" под ред. Николаева Г.А., М., Машиностроение, 1967, с. 47-63.
13. Макаров И.И., Грудзинский Б.В. Устройство для захвата плоских образцов при испытании на растяжение. Авторское свидетельство № 513294, Госкомитет по делам изобретений и открытий СССР, 21 июня 1974. Бюллетень № 17, 1976 г.
14. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Концентрация напряжений в сварных стыковых соединениях со смещением кромок. В сб. "Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций", Мг, Машиностроение, № 133, с.29-41 (МВТУ).
15. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Прочность сварных стыковых соединений сплава АМг-6 с газовыми порами. В сб. "Материалы по металлическим конструкциям" под ред. Мельникова, М., Стройиздат, 1973, вып.17 (ЦНИИПроектстальконструкция).
16. Макаров И.И., Прохоров Н.Н., Волинский В.Н. Влияние пор и окисных включений на прочность стыковых соединений. "Автоматическая сварка", 1976, № 4.
17. Макаров И.И., Прохоров Н.Н. Прочность сварных стыковых соединений АМг-6 с технологическими отклонениями при криогенных температурах. В сб. "Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций" под ред. Винокурова В.А., 1974, № 182 (МВТУ).
18. Макаров И.И., Прохоров Н.Н., Волинский В.Н. Прочность и выносливость сварных стыковых соединений АМг-6 толщиной до 30 мм со смещением кромок при нормальной и криогенной температурах. Материалы всесоюзного семинара "Прочность соединений и конструкций при переменных нагрузках" под ред. Клыкова И.А. и Клыковой Г.И., 23 мая 1974 г., Челябинск, (ЧДНТП).

19. Макаров И.И., Прохоров Н.Н., Завалишин С.И. Концентрация напряжений в сварных стыковых швах с порами. Труды МВТУ им. Баумана под ред. Винокурова В.А., М., 1974, № 182.
20. Макаров И.И., Прохоров Н.Н., Завалишин С.И. Концентрация напряжений около сферических пор в стыковых соединениях. "Сварочное производство", 1975, № 5.

Материалы диссертации докладывались:

1. На научно-техническом совете Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института подъемно-транспортного машиностроения (ВНИИПТМАШ), 30 марта 1976 г.
2. На научном семинаре сварщиков в МВТУ им. Баумана, 21 сентября 1976 г.
3. На всесоюзном совещании "Пути повышения производительности труда и экономии металла при изготовлении сварных строительных металлоконструкций", г. Челябинск, 20-22 июня, 1973 г., Центральное и областное научно-техническое общество стройиндустрии.
4. На УП Всесоюзной научно-технической конференции "Современные методы и средства контроля качества металлов и изделий без разрушения", Киев, 1974 г. (Госкомитет стандартов, АН УССР, Институт электросварки им. Е.О.Патона).
5. На Всесоюзном семинаре по радиационным и другим методам неразрушающего контроля отрасли. 17-19 мая 1971 г. (НИАТ).
6. На республиканском семинаре-совещании по сварке 3-5 октября 1967 г., г. Вильнюс, Литовский республиканский совет научно-технических обществ.
7. На Всесоюзном семинаре "Прочность сварных соединений и конструкций при переменных нагрузках", г. Челябинск, 22-23 мая 1970 г., Челябинский политехнический институт, ЧДНТИ.

М. Соболев

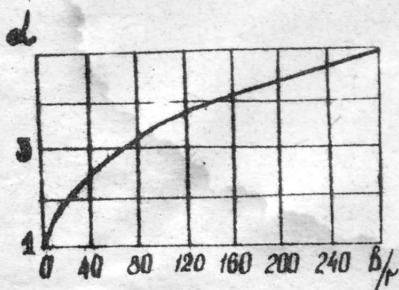


Рис. 1

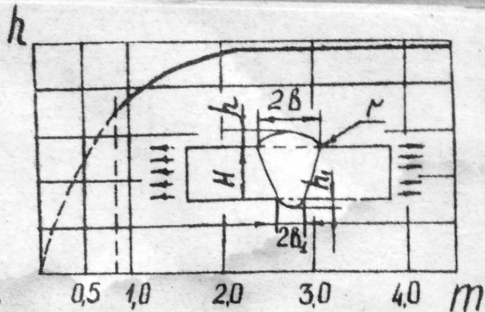


Рис. 2

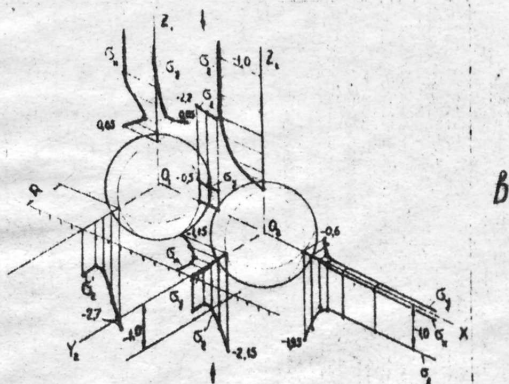
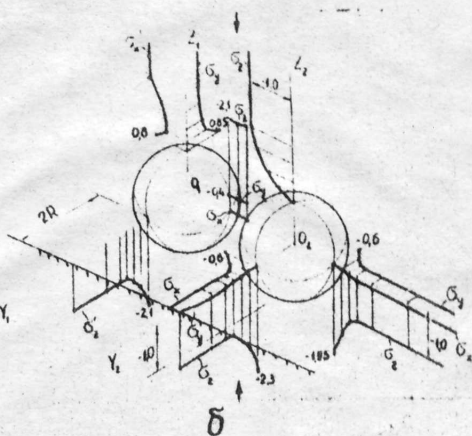
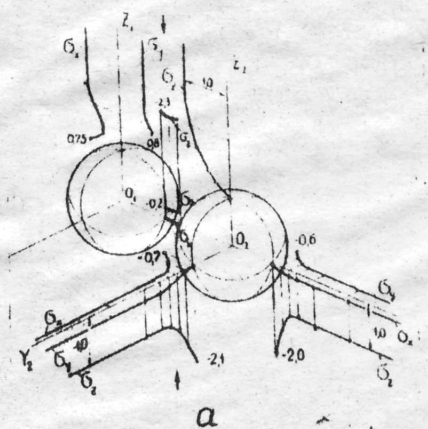


Рис. 3

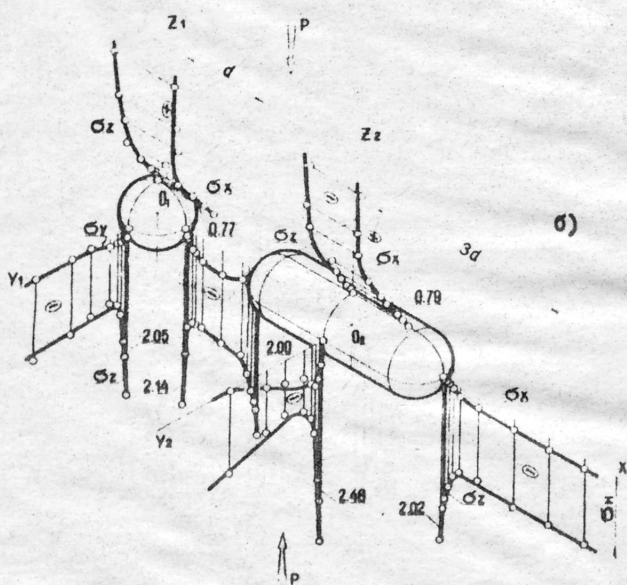
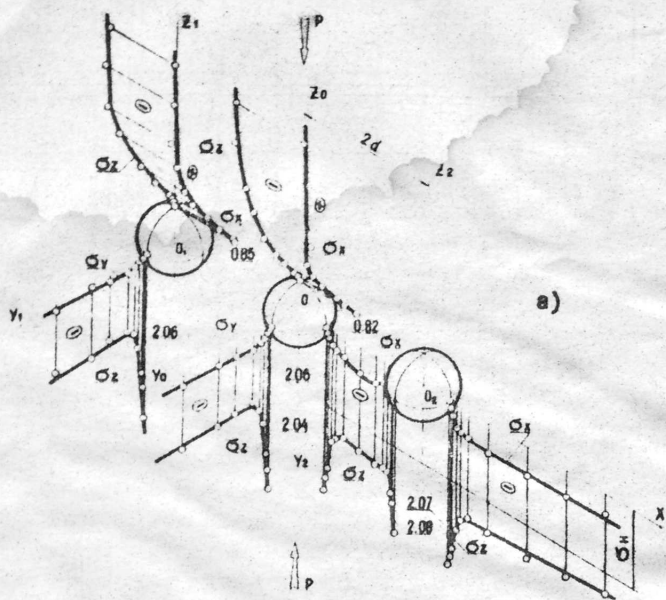


Рис. 4.

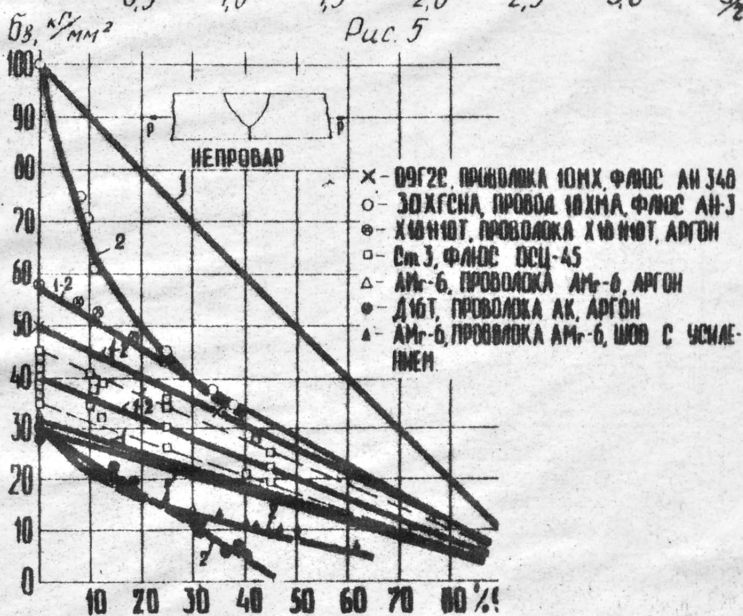
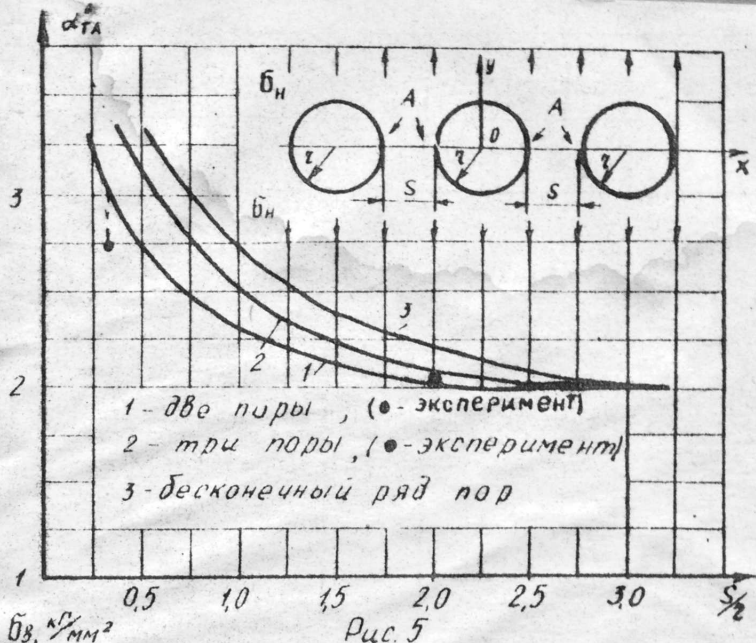


Рис. 6 Глубина непровода 33

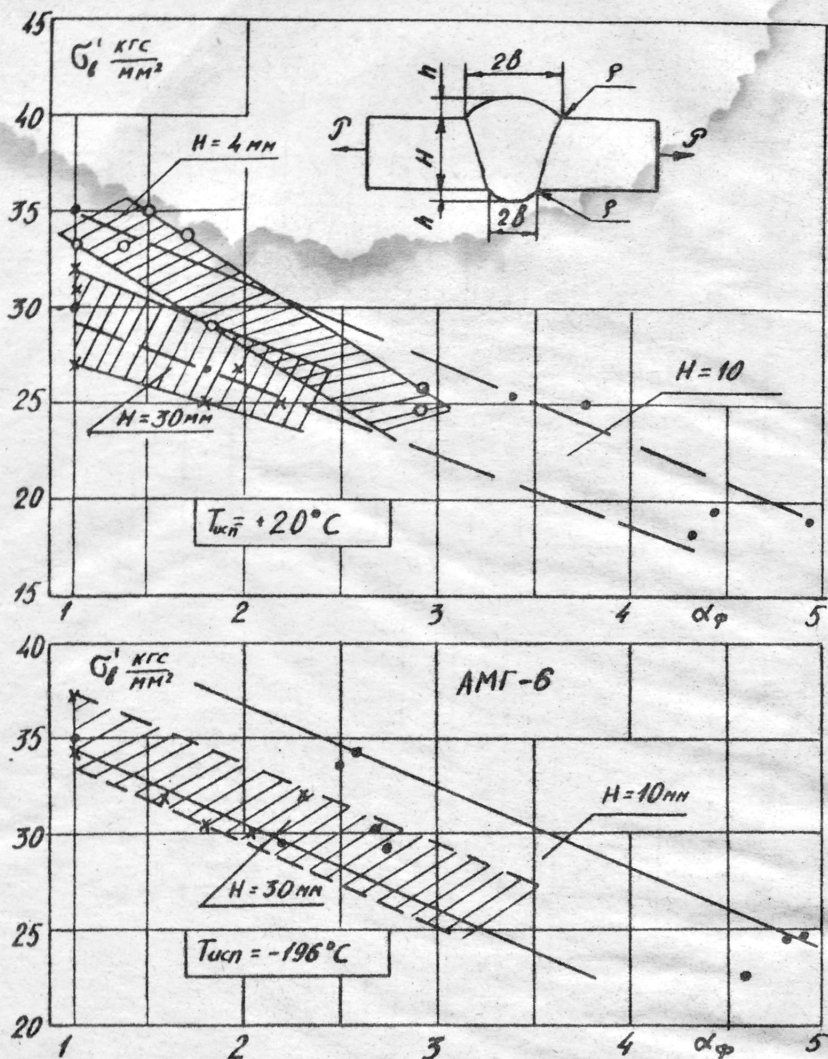


Рис. 7

усиление снято, $r=0,1-0,3$.

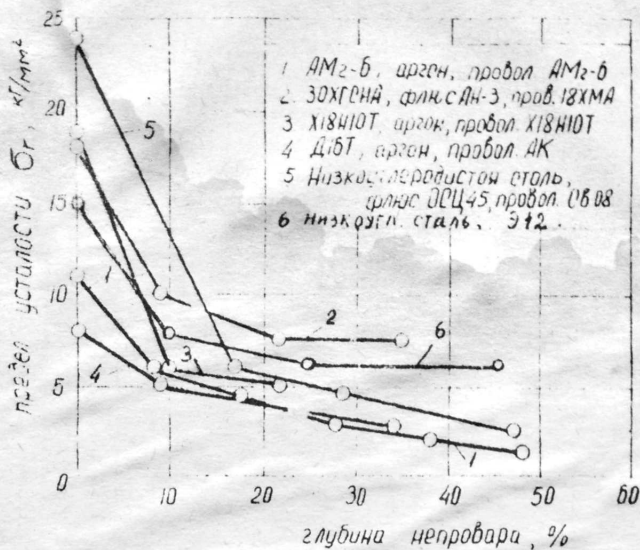


Рис. 8.

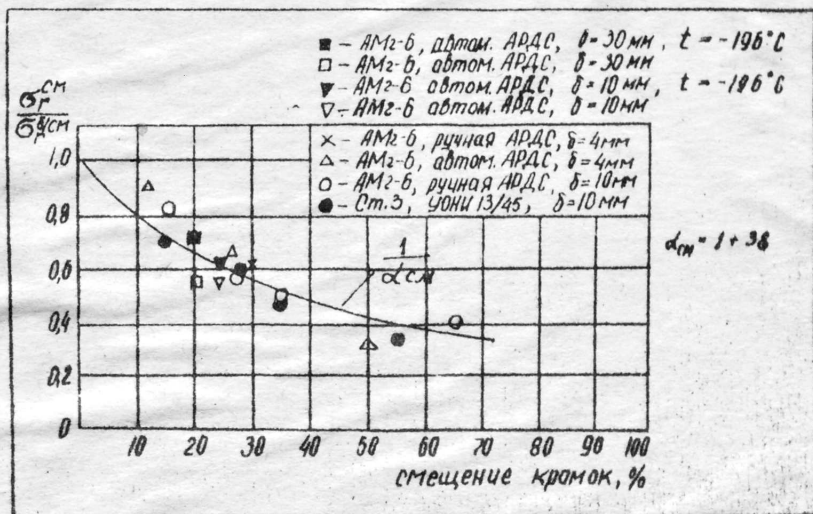
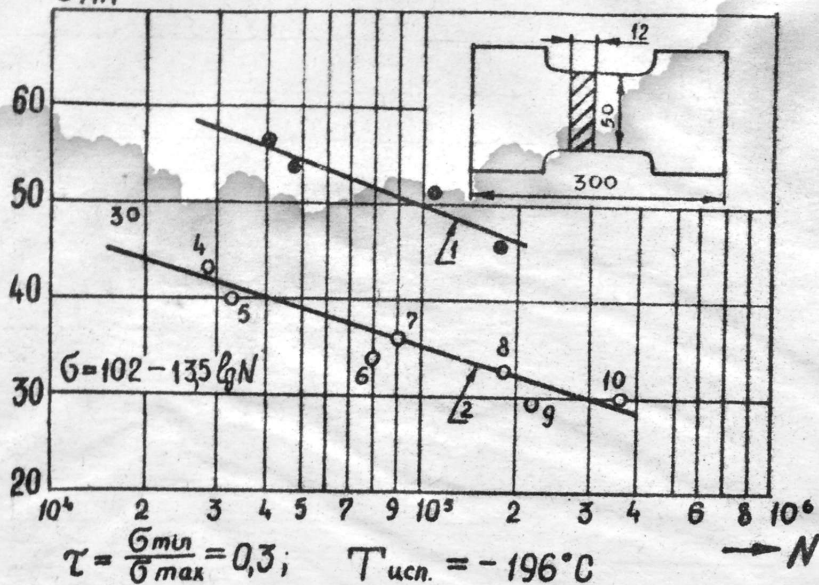


Рис. 9

кгс
мм²

Сталь 12Х18Н10Т; СВ-04Х19Н9



1. Без усиления.

2. С усилением

Образца	3	4	7	4	6	8	9	10
α_g	4,2	4,6	7,5	3	3	4,2	3,0	3,0
α_ϕ	3,6	3,5	3	3,5	3,2	3,5	3,5	3,2
$\alpha_c = \alpha_\phi \cdot \alpha_{см}$	3,6	4,3	6	5,2	5,2	5,3	5,0	3,2
характер разрушения	по дефектам			по границе шва				