

05.03.06  
X 643

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

*Хмарова*  
Хмарова Людмила Ивановна

УДК 621.791.052:539.4.013

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА  
НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ИХ ПРОЧНОСТИ

Специальность: 05.03.06 "Технология и машины  
сварочного производства"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Челябинск, 1988

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Бакин О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Дворецкий В.И.,  
кандидат технических наук, доцент Ачжнович Н.Н.

Ведущее предприятие - институт "Челябинский ПромстройНИИ-проект"


Защита диссертации состоится 8 июня 1988 г. на заседании специализированного совета К 053.13.02 Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола по адресу: 454044, Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЦИИ им. Ленинского комсомола.

Автореферат разослан 6.06.88 1988 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
доцент, канд. техн. наук



Жестков В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Основной задачей капитального строительства на современном этапе является кардинальное повышение эффективности строительного производства, которое заключается в комплексном применении прогрессивных научно-технических достижений, обеспечивающих экономию материальных, топливно-энергетических и трудовых ресурсов. Для успешного решения данной задачи применительно к железобетонным конструкциям необходимо определить пути снижения расхода сварочных материалов, повышения производительности труда и уменьшения металлоемкости сварных узлов арматуры железобетона, выполняемых на монтаже. Важную роль в решении этой проблемы играет рациональное конструктивно-технологическое проектирование сварных соединений стержней и закладных деталей арматуры железобетона, основанное на современных методах расчета, которые в полной мере учитывают такие особенности рассматриваемых соединений, как их механическую неоднородность, наличие дефектов и другие, а также позволяют осуществить оптимизацию формы и геометрических размеров стыковых и угловых швов в рассматриваемых соединениях.

Настоящая диссертация посвящена созданию таких методик расчета и является составной частью комплексной программы работ, порученной кафедре "Оборудование и технология сварочного производства" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, по решению научно-технической проблемы 0.72.01 на 1981-1985 годы (задание 02.01.Н и задание 02.07.Н), утвержденной постановлением Государственного комитета СССР по науке и технике и Госплана СССР от 12 декабря 1980 г. № 472/248 (приложение № 15). Материалы диссертации также использованы в новой программе работ по проблеме 0.72.01 на 1986-1990 г. (задание 04.07.Н), утвержденной постановлением Государственного комитета по науке и технике и Академии наук СССР от 10 ноября 1985 г. № 537/137 (приложение № 7).

Цель работы - создание научно обоснованных методик выбора рациональных конструктивно-геометрических параметров механически неоднородных сварных соединений стержней и закладных деталей арматуры железобетона на основе расчетной оценки их прочности.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Установить влияние механической неоднородности, формы и геометрических параметров разделок свариваемых кромок на несущую способность сварных соединений стержней арматуры и разработать рекомендации по их рациональному проектированию.

2. Провести теоретический и экспериментальный анализ напряженного состояния и прочности стыковых сварных соединений стержней арматуры с поверхностным дефектом в мягком шве (на примере внешнего кольцевого концентратора) в условиях вязкого и квазихрупкого разрушений. Разработать методику нормирования данного дефекта.

3. Провести теоретический и экспериментальный анализ напряженного состояния и прочности тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами закладных деталей арматуры в условиях вязкого разрушения. Разработать рекомендации по оптимизации основных геометрических параметров данных соединений.

Методы исследования. Реализация поставленной задачи в теоретическом плане осуществлена с использованием методов теории пластичности. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния рассматриваемых соединений было проведено методом муаровых полос и поляризационно-оптическим методом. Проверка полученных результатов выполнена на сварных соединениях из горячекатаных арматурных и машиностроительных сталей. В работе также применяли методы металлографического анализа для выявления геометрических параметров и степени механической неоднородности сварных соединений.

Научная новизна. 1. Установлены основные закономерности влияния формы и геометрических параметров разделок свариваемых кромок, соотношения прочностных характеристик основного металла и металла шва на несущую способность сварных соединений стержней арматуры железобетона, заключающиеся в повышении несущей способности соединений с односторонним скосом кромок и X-образной разделкой при уменьшении угла наклона кромок и зазора между ними, а для соединений с шевронной разделкой – с увеличением угла наклона кромок и уменьшением зазора между ними. 2. Показано, что статическая прочность стыковых сварных соединений с внешним целевым дефектом, расположенным в мягком шве, в значительной мере зависит как от величины дефекта, так и от степени механической неоднородности соединений, относительной толщины мягкого шва и условий эксплуатации. 3. Для тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами на основе теоретического анализа показана принципиальная возможность повышения прочности при

постоянных объеме наплавленного металла и глубине проплавления за счет выполнения неравнокатетных угловых швов.

Практическое значение и внедрение. Разработаны "Рекомендации по учету механической неоднородности в стыковых сварных соединениях стержней арматуры железобетонных конструкций", практическое применение которых обеспечивает экономию наплавленного металла за счет выбора рациональных форм и геометрических параметров соединений, позволяющих уменьшить усиление шва. Разработаны рекомендации по определению оптимальных геометрических параметров тавровых и нахлесточных соединений закладных деталей арматуры, обеспечивающих заданный уровень прочности соединений при минимальном объеме наплавленного металла. Основные результаты работы были внедрены в строительных организациях г. Челябинска при монтаже каркасов зданий и сооружений.

Апробация работ. Диссертация заслушана и рекомендована к защите на научном семинаре кафедры "Оборудование и технология сварочного производства" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Основные результаты работы доложены на ежегодных конференциях ЧПИ им. Ленинского комсомола (1983-1986 г.), на Всесоюзных конференциях в Ленинграде (1984 г.), Николаеве (1985 г.), Челябинске (1986 г.) и в Тольятти (1986 г.), на зональной конференции сварщиков Урала в Свердловске (1986 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и приложения. Она содержит 104 страницы машинописного текста, 55 рисунков, 12 таблиц. Список литературы включает 164 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Состояние вопроса. В результате проведенных исследований было установлено, что в сварных соединениях стержней арматуры железобетона, выполняемых при монтаже сборных железобетонных конструкций, имеет место механическая неоднородность свойств, получаемая вследствие того, что металл шва (М) обладает более низкими прочностными характеристиками, чем основной металл (Т) (арматурная сталь класса А-II, А-III). Значения степени механической неоднородности соединений по пределу текучести  $K_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_M}$  и временному сопротивлению

$K_g = \frac{G_g^T}{G_g^H}$  в зависимости от свойств применяемых сварочных проволок составляют  $K_T = 1,3 \dots 2,0$ ,  $K_g = 1,2 \dots 1,5$  (здесь  $G_T^H$ ,  $G_T^T$  и  $G_g^H$ ,  $G_g^T$  — соответственно пределы текучести и временные сопротивления металлов М и Т согласно СН 393-78).

Разработке расчетных методов оценки прочности механически неоднородных сварных соединений при различных видах и условиях нагружения посвящены работы отечественных ученых О.А.Бакши, В.В.Ерофеева, В.Н.Земзина, Н.А.Клыкова, А.Н.Моношкова, А.Д.Немчинского, М.В.Шахматова, Р.З.Шрона, а также работы ряда зарубежных авторов (Сато К., Тоеда М., Дои И. и др.), в которых показано, что механические свойства соединений определяются относительными размерами и свойствами металла мягких прослоек, степенью механической неоднородности соединений, формой и степенью компактности их поперечного сечения.

Несмотря на обширные исследования в данном направлении, вопросы учета влияния степени механической неоднородности, формы и геометрических параметров разделок свариваемых кромок, характерных для соединений стержней арматуры железобетона, на их статическую прочность изучены недостаточно. Последнее не позволяет осуществить выбор рациональных геометрических параметров соединений, обеспечивающих нормативный уровень прочности при минимальном объеме наплавленного металла.

В связи с тем, что строитальные конструкции испытывают в основном статические нагрузки, а металл шва обладает достаточной пластичностью в широком диапазоне климатических температур, целесообразно рассматривать несущую способность сварных соединений стержней арматуры в условиях общей текучести, при которых в полной мере реализуется эффект контактного упрочнения мягких швов. При наличии дефектов сварки большое значение имеют исследования, направленные на изучение работоспособности соединений с дефектом в условиях квазихрупкого разрушения.

При комплексном подходе к вопросам о работоспособности сварных соединений арматуры, выполняемых при монтаже, необходимо рассматривать и разнообразные конструкции закладных и соединительных деталей арматуры железобетона. Элементы закладных деталей соединяют между собой втавр или внахлестку угловыми швами. Значительный вклад в разработку вопросов прочности сварных соединений с угловыми швами внесли О.А.Бакши, В.М.Барышев, В.А.Винокуров, С.А.Данилов, Г.А.Иващенко, Г.А.Николаев, В.И.Махненко, Д.Г.Мосенкис и другие ученые. В связи с тем, что в условиях монтажной площадки сварные соединения за-

кладных деталей арматуры осуществляет в основном ручной дуговой сваркой или механизированными способами с незначительным проплавлением, то одним из резервов экономии ресурсов в данных соединениях является выполнение неравнокатетных угловых швов с оптимальными геометрическими параметрами. Такие соединения имеют более высокую несущую способность при одинаковом объеме наплавленного металла, чем равнокатетные. Рациональное изменение формы и параметров лобовых швов, а также уменьшение их сечения возможно только на основе научно обоснованных методик расчетной оценки несущей способности рассматриваемых соединений.

2. Влияние формы и геометрических параметров разделок свариваемых кромок на предельную несущую способность механически негетерогенных сварных соединений стержней арматуры железобетона и выбор их рациональных геометрических параметров. Согласно ГОСТ 14098-85 сварные соединения стержней арматуры ( $d_H > 20$  мм) при монтаже сборных железобетонных конструкций выполняют с односторонним скосом кромок (см. рис. I, а-в).

Схемы сварных соединений стержней арматуры со скосом одной кромки (а), с V-образной (б), косой (в), X-образной (г) и шевронной (д) разделками свариваемых кромок

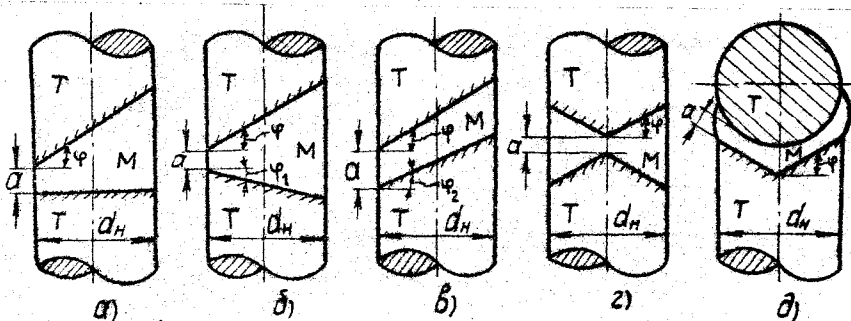


Рис. I.

Несмотря на цилиндрическую форму стержней, геометрия применяемых на практике разделок кромок не позволяет отнести данные соединения к осесимметричным, что в свою очередь затрудняет применение известных методов решения осесимметричных задач в данном случае. Изучение напряженно-деформированного состояния мягких прослоек на моделирующих образцах позволило установить направление траекторий плоскостей скольжения, принять кинематически возможный механизм разрушения данных соединений в условиях общей текучести и на основе

экстремальных принципов теории пластичности установить взаимосвязь предельной несущей способности соединений со степенью механической неоднородности и их конструктивно-геометрическими параметрами.

Средние предельные напряжения (вязкую прочность) стыковых соединений стержней арматуры (рис. 1, а-в) определяли по следующей зависимости:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_a^m}{\sin 2\alpha_i} \left[ 1 + \frac{2(K_B - 1)}{\pi} (\alpha_i \cos \theta_{mi} - \theta_{mi} \sqrt{1 - \theta_{mi}^2}) \right], \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  - угол наклона плоскости максимального сдвига находили из условия минимума мощности внутренних сил;  $\theta_{mi}$  - относительная доля мягкого металла в данной плоскости.

$$\theta_{mi} = \frac{2\alpha/d + \operatorname{tg} \varphi \pm \operatorname{tg} \varphi_i}{2 \operatorname{tg} \alpha_i - \operatorname{tg} \varphi \pm \operatorname{tg} \varphi_i}, \quad (2)$$

где + - для соединений с V-образной разделкой кромок; - - с косой разделкой;  $\alpha/d$  - относительный зазор между кромками;  $\varphi, \varphi_i$  - углы наклона кромок;  $i = 1, 2, 3$  - соответственно для соединений со скосом одной кромки, V-образной и косой прослойками (рис. 1, а-в).

Частный случай полученного решения для соединения с плоской прослойкой ( $\varphi = \varphi_i = 0$ ) имеет хорошее соответствие с известными ранее работами О.А.Бакши и Т.В.Кульневич.

В необходимых случаях, когда в силу ряда причин сварное соединение стержней не обеспечивает заданный уровень прочности, последний можно повысить путем выполнения швов с усилением. Минимальную толщину усиления, при которой обеспечивается равнопрочность соединений основному металлу, в зависимости от механических свойств и геометрических параметров соединений можно представить следующим образом:

$$c = \frac{d}{2} \left( \sqrt{K_B - \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_a^m} + 1} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{cp}$  - величина средних предельных напряжений соединений арматуры без усиления шва.

На основе полученных зависимостей (1)...(3) была разработана методика выбора рациональных форм и геометрических параметров соединений ( $\alpha/d, \varphi$ ), обеспечивающих их максимальную несущую способность за счет полного использования эффекта контактного упрочнения при минимальном объеме наплавленного металла. Для практических инженерных расчетов построены номограммы, с помощью которых можно по заданному нормативному уровню прочности соединений с учетом механической неоднородности определить их рациональные геометрические параметры.



При сварке стержней большого диаметра ( $d_n \geq 36$  мм) выполняют X-образную разделку свариваемых кромок (см. рис. I, г). Такая разделка кромок применяется, как правило, в случаях, когда щелевая разделка приводит к снижению качества и технологичности сварных швов. Тавровые (крестовые) соединения стержней (см. рис. I, д) имеют место при изготовлении закладных деталей в гидротехническом строительстве. Для наиболее полной реализации эффекта контактного упрочнения тавровые соединения стержней рекомендуется выполнять с шевронной разделкой кромок.

Теоретический анализ напряженного состояния и прочности сварных соединений с X-образной и шевронной разделками свариваемых кромок был проведен методом линий скольжения. При построении сеток линий скольжения были использованы графоаналитические принципы решения осесимметричных задач, рассмотренные в работах М. В. Шахматова, В. В. Ерофеева для соединений с плоской прослойкой, с учетом X-образного и шевронного сечений мягкого шва, а также результаты исследования методом муаровых полос. По сеткам линий скольжения, используя общие уравнения данного метода, были получены формулы, определяющие напряженное состояние исследуемых сварных соединений.

Средние предельные напряжения, определяющие несущую способность соединений, определяли по известной ранее зависимости:

$$\sigma_{ср} = \sigma_s \left[ \frac{1}{K_B} + \frac{K_x - 1}{K_B} K_x \right], \quad (4)$$

где  $K_x$  - коэффициент контактного упрочнения, величину которого для соединений с X-образной и шевронной прослойками предлагается определять по формулам:

$$K_x = K_x^x = 1 + \frac{\sin^2(35^\circ 16' - \varphi)}{3\sqrt{2} \operatorname{tg} \varphi} \left\{ 1 - \sqrt{2}(\alpha + \operatorname{tg} \varphi) - \frac{\alpha}{\operatorname{tg} \varphi} \ln \left[ \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\alpha} \right) (1 - \sqrt{2} \operatorname{tg} \varphi) \right] \right\}; \quad (5)$$

$$K_x = K_x^w = 1 + \frac{\sqrt{2}}{3\alpha \cos^3 \varphi} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} - \alpha \right)^2. \quad (6)$$

где  $\alpha = \frac{a}{d}$  - относительный минимальный зазор между кромками.

При уменьшении параметров мягких швов  $\alpha$  до значений  $\alpha_p$  достигается равнопрочность соединений основному металлу:

$$\alpha_p^x \leq \frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{2}}{3K_B + 2} - \operatorname{tg} \varphi \right); \quad (7)$$

$$\alpha_p^w \leq \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ (3K_B \cos^3 \varphi + 2) - \sqrt{(3K_B \cos^3 \varphi + 2)^2 - 4} \right]. \quad (8)$$

Полученные зависимости (7) и (8) могут быть использованы для выбора оптимальных конструктивно-геометрических параметров сварных швов, повышающих работоспособность соединений.

3. Влияние дефектов сварки на прочность механически неоднородных сварных соединений стержней арматуры железобетона. Надежность, долговечность и безопасность работы железобетонных конструкций в процессе эксплуатации в значительной степени определяются качеством выполнения концевых сварных соединений арматуры железобетона. Использование ванной сварки для соединения стержней арматуры в условиях монтажа обеспечивает высокую производительность труда при стабильном и хорошем качестве сварных швов. Однако исключить полностью дефекты в соединениях стержней пока не удастся. Внутренними дефектами в рассматриваемых соединениях могут быть непровар в корне шва, поры, шлаковые включения и т.д. Влияние внутреннего шелевидного дефекта в центральной корневой части шва на несущую способность механически неоднородных сварных соединений в условиях осесимметричной деформации было рассмотрено ранее в работах М.В.Шахматова и В.В.Ерофеева, где было показано, что вязкую прочность таких соединений можно определять по формуле:

$$G_{ср} = G_B \left[ \frac{1 - e/d}{K_B} + \frac{K_B - 1}{K_B} K_{\alpha}^e \right], \quad (9)$$

где  $K_{\alpha}^e = \frac{1}{3} (1 - e/d) + \frac{\sqrt{2}}{6\alpha} (1 - e/d)^2 + \frac{\sqrt{2}}{3} \alpha$ ;  $e/d$  — относительный размер дефекта.

Наиболее опасным из поверхностных дефектов в соединениях стержней арматуры является шелевидный дефект, расположенный в срединной плоскости мягкого шва. При оценке влияния данного дефекта на прочность принимали, что дефект имеет кольцевую форму, учитывая при этом, что уменьшение длины дефекта или смещение его к границам будет создавать некоторый запас прочности по сравнению с принятой расчетной схемой.

Теоретический анализ вязкой прочности соединений стержней с внешним кольцевым дефектом, расположенным в мягком шве, был проведен методом линий скольжения с учетом величины перенапряжения в вершине дефекта. Средние предельные напряжения (вязкую прочность) рассматриваемых соединений определяли по зависимости (4), при этом

$$K_{\alpha} = K_{\alpha e} \quad (e/d < 0,5)$$

$$K_{\alpha e} = 1 - \frac{2}{3} (1 - e/d) + \frac{\sqrt{2}}{6\alpha} (1 - e/d)^2 + \frac{\sqrt{2}}{3} \alpha, \quad (10)$$

где  $e/d$  — относительная глубина дефекта.

Однако в условиях эксплуатации, особенно при низких температурах, сварные соединения стержней при наличии дефектов обладают ограниченным ресурсом пластичности. В таких случаях будет иметь место квазихрупкое разрушение. Оценку несущей способности соединений стержней с кольцевым дефектом в условиях квазихрупкого разрушения получали с использованием модели локальной текучести, предложенной А.Е.Андрейкивом, С.Е.Ковчиком, И.Н.Панько в следующей форме

$$\sigma_{кр} = \frac{K_{lc} (1 - e/d)^{3/2} \sqrt{1 + 4e/d}}{0,79 \sqrt{\pi e}}, \quad (II)$$

где  $K_{lc}$  - критическое значение коэффициента интенсивности напряжений для рассматриваемого материала.

Результаты анализа на стадии проектирования позволяют определить диапазон размеров вышеуказанных дефектов, не приводящих к снижению прочности механически неоднородных сварных соединений ниже уровня допускаемых напряжений.

4. Оптимизация основных геометрических параметров тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами закладных деталей арматуры железобетона на основе расчетной оценки их прочности. При изучении характера пластического деформирования и особенностей напряженного состояния рассматриваемых соединений по картинам муаровых полос было установлено, что местоположение опасного сечения в соединениях находится в существенной зависимости от угла наклона внешней грани швов ( $\beta$ ), глубины проплавления пластин ( $h$ ) и площади (объема) наплавленного металла ( $F$ ). С учетом этих данных, а также расчетных зависимостей В.И.Махненко и В.А.Винокурова и экспериментов Н.Л.Зайцева было установлено, что хорошее соответствие реально протекающим процессам пластического деформирования тавровых и нахлесточных соединений дает метод, основанный на построении кинематически возможного поля скоростей.

Исходя из баланса мощности внутренних и внешних сил ( $\omega_p = \omega_g$ ) было получено выражение для оценки несущей способности (средних предельных напряжений  $\sigma_{ср}$ ) рассматриваемых соединений

$$\sigma_{ср} = \frac{2}{\sqrt{3}} G_B \Psi K_{\eta B}, \quad (I2)$$

где  $\Psi = \frac{\sqrt{2F}}{B}$  - параметр, характеризующий относительную площадь наплавленного металла,  $K_{\eta B}$  - коэффициент, зависящий от геометрических параметров соединений,  $B$  - ширина пластины.

$$\text{Для тавровых соединений} \quad K_{\eta\beta} = \left(\eta + \frac{1}{\sqrt{\tan\beta}}\right) \frac{\sin\beta}{\sin(\beta+\theta_1)\sin\theta_1}; \quad \text{Для нахлесточных соединений} \quad K_{\eta\beta} = \left(\eta + \sqrt{\tan\beta}\right) \frac{\cos\beta}{\sin(\beta+\theta_1)\sin\theta_1}, \quad (13)$$

где  $\eta = \frac{h}{\sqrt{2F}}$  - относительная глубина проплавления пластин,  $\theta_1$  - угол наклона плоскости разрушения.

Для тавровых соединений:  $\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}$  при  $\beta_* \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$ , где  $\eta = \tan\frac{\beta_*}{2} \sqrt{\tan\beta_*}$ ,  $\theta_2 = \arctg\left(\frac{\sqrt{\tan\beta}}{\eta}\right)$ ; при  $\arctg(\eta^2) = \beta_{**} \leq \beta \leq \beta_*$ ;  $\theta_3 = \frac{\pi}{4}$  при  $0 \leq \beta \leq \beta_{**}$ . Для нахлесточных соединений с лобовыми швами:  $\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}$  при  $0 \leq \beta \leq \beta_*$ , где  $\frac{1}{\eta} = \tan\frac{\beta_*}{2} \sqrt{\tan\beta_*}$ ;  $\theta_2 = \arctg(\eta \sqrt{\tan\beta})$  при  $\beta_* \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$ .

Анализ полученных зависимостей (12) и (13) открывает возможность оптимизации геометрических параметров рассматриваемых соединений. На основе экстремальных принципов теории пластичности были найдены соотношения, позволяющие по известному значению параметра  $\eta$  определить оптимальные значения углов наклона внешней грани шва  $\beta = \beta_{opt}$ , обеспечивающие максимальную несущую способность соединений.

Для тавровых соединений

$$\eta = \frac{1 - 2\cos\beta_{opt}}{\sqrt{2\sin 2\beta_{opt}}};$$

Для нахлесточных соединений

$$\eta = \frac{1 - 2\cos\beta_{opt}}{\sqrt{2\sin 2\beta_{opt}}} \left(-\operatorname{ctg} \frac{\beta_{opt}}{2}\right), \quad (14)$$

Для практических инженерных расчетов построены номограммы, с помощью которых по известным геометрическим параметрам соединений можно определить их несущую способность. Кроме того, данные номограммы можно использовать для определения сочетания параметров соединений ( $\beta_p, \eta_p, \psi_p$ ), обеспечивающих их прочность на уровне прочности основного металла, то есть определить максимальную несущую способность соединений при минимальном объеме наплавленного металла.

5. Экспериментальное исследование несущей способности сварных соединений арматуры железобетона. Проверку расчетных зависимостей проводили на моделях и реальных сварных соединениях. Модели соединений стержней изготавливали пайкой из стали ст.3 и свинца С-1. Реальные сварные соединения стержней изготавливали из арматурной стали класса А-III марки 35ГС проволоками Св-08 и Св-08А и электродами УОНИ-13/45. Сварку осуществляли в условиях монтажной площадки. Относительные размеры мягкой прослойки варьировали в пределах  $a/d = 0,15 \dots 0,5$ , углы наклона кромок  $\psi = 10 \dots 40^\circ$ . После сварки

усиление швов снимали механической обработкой. Испытания проводили на машине ЦДМ-200ПУ с записью диаграмм  $\sigma - \delta$  ( $\delta$  - относительное удлинение образца). Сварные соединения стержней разрушались по металлу шва в условиях общей текучести. Несущая способность соединений стержней с внутренними дефектами соответствовала расчетным значениям по формуле (9). Тавровые и нахлесточные соединения с лобовыми швами изготавливали из стали 15ХСНД проволокой Св-08Г2С. При сварке варьировали основные геометрические параметры соединений  $\beta$ ,  $h$ ,  $F$ . Для изучения особенностей напряженного состояния соединений были выполнены модели из оптически чувствительного материала ЭД-6.

Результаты проведенных экспериментальных исследований, а также экспериментальные данные других авторов подтвердили теоретические положения о механическом поведении сварных соединений стержней и закладных деталей арматуры железобетона.

В диссертации рассмотрены данные по внедрению результатов работы для сварки концевых сварных соединений стержней и закладных деталей арматуры железобетона при монтаже каркасов зданий и сооружений.

Развитие научных положений было проведено на примере исследования работоспособности сварных соединений арматуры железобетона. Полученные в работе рекомендации по рациональному проектированию механически неоднородных сварных соединений стержней с косой, V-образной, X-образной и шевронной мягкими прослойками, а также тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами могут быть использованы в других отраслях народного хозяйства.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На работоспособность сварных соединений стержней арматуры железобетона существенное влияние оказывают геометрическая форма и размеры участков с пониженным по сравнению с основным металлом сопротивлением пластическому деформированию, в качестве которых выступают мягкие сварные швы. Для обеспечения требуемого уровня прочности рассматриваемые соединения следует выполнять с рациональными конструктивно-геометрическими параметрами разделок свариваемых кромок, которые, с одной стороны, обеспечивают максимальную несущую способность соединений за счет полного использования эффекта контактного упрочнения, а с другой стороны - технологическую возможность их выполнения.

2. На основании теоретического и экспериментального анализа установлена количественная зависимость влияния механической неоднородности  $K_s$ , величины зазора между свариваемыми кромками  $\alpha/d$  и угла их наклона  $\varphi$  на несущую способность соединений стержней арматуры железобетона с V-образной, косой и X-образной разделками кромок. Статическую прочность указанных соединений при одинаковой степени механической неоднородности можно повысить путем уменьшения угла наклона кромок и зазора между ними.

3. В сварных соединениях стержней арматуры с односторонними скосами свариваемых кромок при одинаковых геометрических параметрах разделок ( $\alpha/d$ ,  $\varphi$ ) вариант с наклоненными кромками (косая разделка) имеет некоторые преимущества по статической прочности и металлоемкости шва по сравнению с соединениями с V-образной разделкой или со скосом верхней кромки. Поэтому при ванной сварке стержней арматуры в горизонтальном положении целесообразно выполнять скос свариваемых кромок и увеличивать зазор между ними. При сварке стержней в вертикальном положении, где по технологическим соображениям наличие скоса верхней кромки необходимо, следует применять разделку с параллельными наклоненными кромками с углом наклона не более  $40^\circ$  с наименьшим зазором между ними.

4. В тех случаях, когда сварные соединения стержней арматуры обеспечивают нормативного уровня прочности, их следует выполнять с усилением шва, размеры которого определяются с учетом величины контактного упрочнения, обусловленного конструктивно-геометрическими параметрами и механическими свойствами соединений. Более полное использование эффекта контактного упрочнения позволяет уменьшить величину усиления шва и повысить его экономичность при обеспечении необходимого уровня прочности.

5. При выполнении тавровых соединений стержней арматуры железобетона предпочтительным является вариант с шевронной разделкой кромок. Показано, что несущая способность соединений находится в существенной зависимости от относительной величины зазора  $\alpha/d$  между стыкуемыми кромками, угла их наклона  $\varphi$  и степени механической неоднородности  $K_s$ . Отличительная особенность заключается в том, что с увеличением параметра  $\varphi$  несущая способность соединений возрастает.

6. Наружный дефект сварки, принятый в виде кольцевого концентратора в мягком шве, снижает несущую способность сварных стыковых соединений стержней арматуры. Установлена количественная зависи-

мость влияния глубины концентратора на степень контактного упрочнения соединений с учетом их основных геометрических параметров и механических свойств. Это дает возможность по заданному уровню прочности в условиях вязкого разрушения определить допускаемую величину дефекта.

7. Соотношение катетов угловых швов, глубина проплавления пластин и площадь (объем) наплавленного металла оказывают существенное влияние на прочность тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми неравнокатетными швами закладных и соединительных деталей арматуры железобетона при вязком разрушении. Теоретически и экспериментально показано, что статическая прочность рассматриваемых соединений возрастает с увеличением площади (объема) наплавленного металла и особенно с увеличением глубины проплавления пластин. Разработанные для практических инженерных расчетов прочностные номограммы позволяют определить оптимальные значения конструктивно-геометрических параметров сварных швов, обеспечивающих равнопрочность сварных соединений основному металлу, то есть определить максимальную несущую способность при наименьшем объеме наплавленного металла.

8. Несущая способность тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами закладных деталей арматуры в значительной степени зависит от угла наклона внешней грани угловых швов  $\beta$ . В условиях вязкого разрушения для рассматриваемых соединений, выполненных ручной дуговой сваркой без проплавления стенок, оптимальные значения угла  $\beta_{opt} = 60^\circ$ . С увеличением глубины проплавления при постоянном объеме наплавленного металла при механизированной сварке в тавровых соединениях оптимальные значения угла  $\beta$  смещаются в область больших величин  $\beta_{opt} > 60^\circ$ . В лобовых швах нахлесточных соединений с ростом глубины проплавления наблюдается уменьшение оптимальных значений  $\beta_{opt} < 60^\circ$ .

9. Разработанные расчетные методики оценки прочности сварных соединений стержней и закладных деталей арматуры железобетона позволяют осуществить выбор рациональных конструктивно-геометрических параметров сварных швов, практическое использование которых на практике обеспечивает значительную экономию трудовых и материальных ресурсов.

Результаты работы внедрены в строительных организациях г. Челябинска, о чем свидетельствуют акты внедрения, приложенные к работе.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Влияние геометрических параметров механически неоднородных сварных соединений стержней арматуры на их предельную несущую способность / М.В.Шахматов, Л.И.Хмарова, О.А.Бакши, Ю.С. Абу // Сварочное производство. - 1986. - № 6. - С.28-30.
2. Шахматов М.В., Хмарова Л.И., Топышев Ю.А. Расчетная оценка статической прочности механически неоднородных сварных соединений с X-образной разделкой свариваемых кромок // Сварочное производство. - 1985. - № 9. - С.33-35.
3. Оптимизация конструктивных и геометрических параметров стыковых сварных соединений теплоустойчивых разнородных сталей / М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, Л.И.Хмарова и др. // Автоматическая сварка. - 1987. - № 8. - С.27-31.
4. Хмарова Л.И. Расчетная оценка прочности сварных соединений стержневой арматуры железобетона // Вопросы сварочного производства: Сб. науч. тр. - Челябинск: Челяб. политехн. ин-т, 1985. - С. 67-73.
5. Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Хмарова Л.И. Влияние геометрических параметров сварных соединений с угловыми швами на их несущую способность и сопротивляемость хрупким разрушениям // Автоматическая сварка. - 1986. - № 5. - С.7-12.
6. Несущая способность сварных соединений с угловыми швами при вязком разрушении. Сообщение I / М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, Л.И.Хмарова, А.А.Остсемин // Проблемы прочности. - 1986. - № 9. - С.91-96.
7. Несущая способность сварных соединений с угловыми швами при квазихрупком и хрупком разрушении. Сообщение 2 / М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, Л.И.Хмарова, А.А. Остсемин // Проблемы прочности. - 1986. - № 9. - С.97-104.
8. Хмарова Л.И., Ерофеев В.В., Шахматов М.В. Трещиностойкость тавровых соединений из сплава АМг6 // Тез. докл. III Всесоюзн. конф. по сварке цветных металлов. - Гольяты, 1986. - С.35.
9. Хмарова Л.И., Бакши О.А. О рациональном проектировании механически неоднородных сварных соединений стержней арматуры железобетона // Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве: Тез. докл. Всесоюзной конф. - Челябинск: Уральский дом научно-технической пропаганды, 1986. - С.281-282.



10. Хмарова Л.И. Напряженное состояние и прочность сварных соединений стержней арматуры с наружным кольцевым дефектом в мягкой прослойке // Прогрессивная технология, механизация и автоматизация сварочного производства: Тез. докл. 16 зональной конф. сварщиков Урала. - Свердловск, 1986. - С. 116-117.

11. Хмарова Л.И., Ерофеев В.В., Ерофеев М.В. Статическая прочность сварных соединений с угловыми швами из стали 15ХСНД // Повышение надежности тяжелонагруженных деталей машин: Сб. научн. тр. - Челябинск: Челяб. политехн. ин-т, 1986. - С. 125-131.

12. Влияние глубины внешнего кольцевого концентратора на предельную несущую способность сварных соединений стержней арматуры / М.В.Шахматов, Л.И.Хмарова, В.В.Ерофеев, В.М.Яманов // Исследование эффективных металлических конструкций: Сб. научн. тр. - Красноярск: ПромстройНИИпроект, 1985. - С.88-94.

13. Оценка несущей способности сварных соединений из теплоустойчивой стали с V-образным аустенитным швом / М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, О.А.Бакиш, Л.И.Хмарова и др. // Проблемы технологии сварки теплоустойчивых, жаростойких и жаропрочных высоколегированных сталей и сплавов: Тез. докл. II Всесоюзн. конф. - Киев: ИЭС им. Е.О.Латона, 1985. - С.31-32.

14. Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Хмарова Л.И. К вопросу о несущей способности тавровых сварных соединений арматурных стержней // Теория и практика сварочного производства: Межвузовский сборник. - Свердловск: УЛМ им. С.М.Кирова, 1986. - С.57-62.

