

05.02.10  
У 457

На правах рукописи

**Усманова Екатерина Александровна**

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
АРМАТУРЫ И ЗАКЛАДНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ИХ  
КОНСТРУКТИВНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 05.02.10 «Сварка, родственные процессы  
и технологии» (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Шахматов Михаил Васильевич.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Шалимов Михаил Петрович,**  
Заведующий кафедрой  
«Технология сварочного производства»  
ГОУ ВПО «Уральский государственный  
университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина»;

кандидат технических наук, доцент  
**Архипова Елена Валерьевна**  
Доцент кафедры  
«Технология транспортного производства»  
ГОУ ВПО «Челябинский институт  
путей сообщения».

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Курганский государственный университет»

Защита состоится 01 июня 2011 г., в 11.00, на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 201а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Южно-Уральского государственного университета».

Автореферат разослан 25 апреля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Щуров И.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** В строительной отрасли набирают темп современные прогрессивные методы возведения зданий и сооружений из сборных и сборно-монолитных железобетонных конструкций, применение которых позволяет существенно улучшить качество строительных конструкций, снизить трудоемкость работ при монтаже, значительно сократить сроки строительства. Скорость и качество возведения зданий во многом зависят от выполнения строительно-монтажных работ, в том числе от эффективности выполнения сварочных операций, на которые приходится основной объем арматурных работ. Важную роль в решении этой проблемы играет рациональное, основанное на использовании современных методов расчета, конструктивно-технологическое проектирование сварных соединений стержней и закладных изделий арматуры железобетонных конструкций, которое в полной мере учитывает такие особенности рассматриваемых соединений, как их механическую неоднородность, наличие концентраторов напряжений и условия работы, а также позволяет осуществить оптимизацию формы и геометрических размеров стыковых и угловых швов в рассматриваемых соединениях, что в свою очередь обеспечит экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Настоящая диссертация посвящена созданию таких методов расчета и является составной частью Инновационной образовательной программы работ, порученной кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» в рамках НИУ Южно-Уральский государственный университет.

**Цель** работы состояла в создании научно обоснованных методик оценки влияния конструктивно-геометрических параметров сварных швов на несущую способность соединений стержней и закладных и соединительных изделий арматуры железобетонных конструкций и в разработке на этой основе рекомендаций по их рациональному проектированию.

Реализация цели диссертационной работы осуществлялась путем постановки и решения следующих основных задач:

- выполнить аналитический обзор методов оценки напряженного состояния и статической прочности сварных соединений и разработать общий алгоритм такой оценки применительно к сварным соединениям стержней и закладных изделий арматуры железобетона;
- на основе теоретического анализа получить количественную оценку влияния конструктивно-геометрических параметров сварных швов на несущую способность механически неоднородных стыковых сварных соединений стержней арматуры железобетона для различных разделок свариваемых кромок;
- оценить влияние концентрации напряжений в местах перехода от сварного шва к основному металлу на несущую способность стыковых соединений стержней и тавровых и нахлесточных соединений закладных и соединительных изделий арматуры железобетона;
- разработать общий подход к оценке прочности сварных тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами закладных и соединительных изделий арматуры железобетона в условиях вязкого и хрупкого разрушений и определить области их безопасной эксплуатации;
- установить зависимость влияния относительной толщины мягкой прослойки и компактности поперечного сечения реальных сварных соединений и вырезаемых из них образцов на их прочностные характеристики.

**Методы исследования.** Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния и несущей способности сварных соединений стержней и закладных и соединительных изделий с угловыми швами выполнен на основе кинематической теоремы предельного равновесия. Для анализа хрупких и квазихрупких разрушений сварных соединений использовали подходы линейной механики разрушения и теории концентрации напряжений. Для проведения численных расчетов применен пакет ANSYS. Применялись механические методы испытания образцов на растяжение, неразрушающие методы контроля, методы микро- и макроскопического исследования структуры сварных соединений. Исследования проводились в лабораторных и промышленных условиях на

образцах и реальных сварных соединениях стержней арматуры, тавровых и нахлесточных соединениях закладных изделий с угловыми швами.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается глубокой теоретической проработкой, численными расчетами и экспериментальными исследованиями. Полученные результаты обосновываются сопоставлением с известными теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

#### **Научная новизна:**

1. Установлена взаимосвязь формы и геометрических параметров стыковых швов в механически неоднородных сварных соединениях с направлением траекторий полос скольжения и на основе этого получена расчетная оценка статической прочности сварных соединений стержней арматуры железобетона.

2. Выявлена зависимость величины коэффициентов концентрации напряжения в местах перехода сварного шва к основному металлу от конструктивно-геометрических параметров стыковых соединений стержней арматуры и угловых швов соединений закладных изделий железобетона. Предложено проводить оценку опасности локального разрушения в зонах с высокой концентрацией напряжений в зависимости от ее величины с учетом исчерпания ресурса пластичности металла соединений в данных зонах.

3. Установлено влияние соотношения катетов, глубины проплавления и объема наплавленного металла на несущую способность сварных соединений закладных и соединительных изделий арматуры железобетона в условиях вязкого и хрупкого разрушений. Предложен критерий соотношения вероятности вязкого и хрупкого разрушений для реального сварного соединения.

4. Разработана методика оценки прочностных характеристик сварных соединений, по результатам испытания вырезаемых из них образцов с учетом корректировочного коэффициента приведения, величина которого зависит от механической неоднородности сварного соединения, компактности поперечного сечения образца и его геометрических параметров.

**На защиту выносятся основные результаты исследования по разработке методов конструктивно-технологического проектирования и изготовления**

сварных соединений стержней и закладных и соединительных изделий арматуры железобетона, позволяющие снизить металлоемкость и энергоемкость сварных швов, обеспечивая необходимый уровень прочности в условиях вязкого и хрупкого разрушений. В работе представлены теоретические обоснования полученных результатов исследования и практические рекомендации.

**Практическая значимость работы.** На основе результатов проведенных исследований были разработаны практические рекомендации по рациональному проектированию сварных соединений стержней и закладных и соединительных изделий арматуры железобетона путем выбора оптимальных конструктивно-геометрических параметров сварных швов. Выбор рациональных форм и геометрических параметров разделок свариваемых кромок с учетом величины контактного упрочнения позволил уменьшить усиление шва без снижения прочности соединений, а также уменьшить концентрацию напряжений в месте перехода шва к основному металлу. Выполнение лобовых швов тавровых и нахлесточных соединений неравнокатетными с оптимальной геометрией позволяет предотвратить квазихрупкие и хрупкие разрушения указанных соединений путем уменьшения концентрации напряжений в зоне непровара и в местах перехода сварного шва к основному металлу. Разработанные мероприятия приводят к значительной экономии наплавленного металла и уменьшению энергоемкости изготовления сварных конструкций.

Результаты исследований в опытном порядке внедрены в организациях г. Челябинска, о чем свидетельствуют соответствующие акты выполненных работ.

**Апробация работы.** Результаты работы обсуждались и докладывались на Международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (г. Миасс, 2010); Международной научно-технической конференции «Специальные методы сварки для модернизации в машиностроении» в рамках VII Международной специализированной выставки «Металлообработка. Сварка. Урал 2010» (г. Екатеринбург, 2010); Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии и модернизация в сварочном производстве» в рамках X Международной выставки «Сварка. Контроль и диагностика».

Урал 2010» (г. Екатеринбург, 2010); Всероссийской научно-технической конференции «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (г. Орск, 2011), XXXX Российском семинаре «Механика и процессы управления» Межрегионального совета по науки и технологиям (г. Миасс, 2010 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка литературы из 165 источников и приложения; изложена на 151 страницах машинописного текста и включает 40 рисунков, 12 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи проведенных исследований, а также обоснована их актуальность.

**В первой главе** рассмотрена существующая технология сварки стержней и закладных изделий арматуры при монтаже сборных железобетонных конструкций. Существующие нормативные документы, регламентирующие указанные сварные соединения, предусматривают большое количество конструктивно-геометрических параметров сварных швов, которые оказывают значительное влияние на несущую способность данных соединений. К таким параметрам относятся: форма разделок свариваемых кромок, величина зазора в корне шва, угол наклона кромок, форма усилений шва встыковых соединениях арматуры, а также соотношение катетов, объем наплавленного металла, глубина проплавления стенок, форма усиления угловых швов в соединениях закладных изделий. В результате проведенных исследований было установлено, что в сварных соединениях стержней арматуры железобетона, выполняемых ванной сваркой, имеет место механическая неоднородность свойств, получаемая вследствие того, что металл шва обладает более низкими прочностными характеристиками, чем основной металл (арматурная сталь класса А – II и А – III).

При изучении работоспособности механически неоднородных сварных соединений для различных условий нагружения в работах О.А. Бакши,

А.Л. Немчинского, Р.З. Шрона, В.Н. Земзина, М.В. Шахматова и многих других исследователей было установлено, что механические свойства таких соединений определяются относительными размерами и свойствами металла мягких прослоек, степенью механической неоднородности соединения, формой и компактностью их поперечного сечения.

Несмотря на обширные исследования в данном направлении, вопросы учета влияния механической неоднородности, формы и геометрических параметров разделок свариваемых кромок, формы и размеров усиления швов, характерных для сварных соединений стержней арматуры железобетона, на их несущую способность изучены недостаточно. Последнее не позволяет осуществить выбор рациональных геометрических параметров соединений, обеспечивающий заданный уровень прочности при минимальном объеме наплавленного металла с учетом концентрации напряжений на границе сварного шва.

При комплексном подходе к вопросам о работоспособности сварных соединений арматуры железобетона, выполняемых при монтаже, необходимо рассматривать и разнообразные конструкции тавровых и нахлесточных соединений с угловыми швами закладных и соединительных изделий из полосового и листового проката. Значительный вклад в разработку вопросов работоспособности сварных соединений с угловыми швами внесли Г.А. Николаев, В.И. Махненко, В.А. Винокуров, О.А. Бакши, М.В. Шахматов, С.А. Данилов и другие исследователи. В связи с тем, что в условиях монтажной площадки сварные соединения закладных изделий арматуры осуществляются 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, обеспечивающими их безопасную эксплуатацию путем уменьшения концентрации напряжений в угловых швах при минимальном объеме наплавленного металла.

Рациональное изменение формы и конструктивно-геометрических параметров сварных швов в сварных соединениях арматуры и закладных изделий

железобетонных конструкций возможно только на основе научно обоснованных методик оценки несущей способности рассматриваемых соединений.

Во второй главе было установлено, что в сварных соединениях на стадии пластического течения происходит образование полос скольжения, наклон которых определяется видом напряженного состояния (одноосное, плоское, объемное), геометрической формой образцов, степенью механической неоднородности, относительной толщиной мягкой прослойки. На основе нахождения углов наклона полос скольжения, согласно экстремальным принципам теории пластичности, разработана методика расчетной оценки статической прочности механически неоднородных сварных соединений стержней арматуры с различной геометрией свариваемых кромок, которые не относятся к классу плоских или осесимметричных задач (рис. 1).

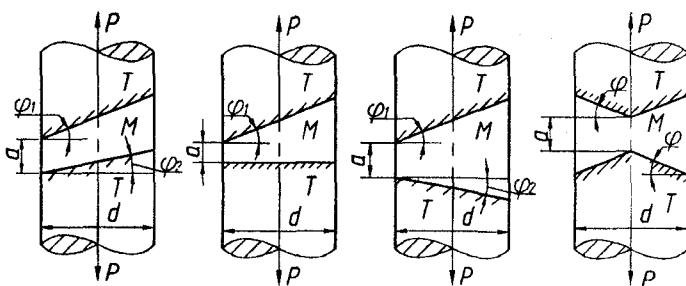


Рис. 1. Расчетные схемы сварных соединений с косой, со скосом одной кромки, V-образной, X-образной мягкими прослойками

Средние предельные напряжения стыковых соединений  $\sigma_{cp}$  стержней арматуры определяли по следующей зависимости:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_B^M}{\pi \sin 2\alpha_i} \left\{ \pi \cdot K_B - 2(K_B - 1) \left[ \arcsin \theta_{mi} - \theta_{mi} \sqrt{1 - \theta_{mi}^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $\sigma_B^M$ ,  $\sigma_B^T$  – временное сопротивление металла шва и основного металла соответственно;  $K_B = \frac{\sigma_B^T}{\sigma_B^M}$  – значение степени механической неоднородности соединений;  $\theta_{mi}$  – относительная доля мягкого металла в плоскости разрушения, определяли из геометрических соображений;  $\alpha_i$  – угол наклона плоскости

максимального сдвига (разрушения), находили из условия минимума мощности внутренних сил.

Для оценки приемлемости использования расчетных формул для определения значений  $\alpha_i$  в соединениях с косой и V-образной разделками кромок проводили численный эксперимент (МКЭ) в ПК ANSYS, в ходе которого было установлено соответствие теоретических и полученных по картинам напряженно-деформированного состояния направлений опасных сечений.

Для практических инженерных расчетов построены nomограммы, позволяющие определить зависимость уровня прочности соединений с учетом механической неоднородности от геометрических параметров сварных швов.

Анализ формы и размеров усиления сварных швов стержней арматуры, выполненных ванной сваркой, показывают наличие в них геометрической неоднородности, в результате которой образуется концентрация напряжений в местах перехода от шва к основному металлу, которая оказывает существенное влияние на несущую способность указанных соединений и при сочетании неблагоприятных факторов может стать причиной хрупких разрушений.

Путем аппроксимации многочисленных расчетов была получена зависимость коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_c$  от геометрических параметров сварных швов стыковых соединений стержней (рис. 2):

$$\alpha_c = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{R \cdot \operatorname{ctg} 0,5\varphi}{C} + \frac{4R}{D} + \frac{5R}{B+R} \right)^2}}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус перехода от шва к основному металлу,  $\varphi$  – угол наклона касательной к усилиению шва,  $C$  – высота усиления;  $D$  – диаметр стержней;  $B$  – максимальная ширина усиления в меридиональном сечении.

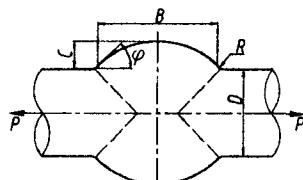


Рис. 2. Расчетная схема стыкового соединения арматуры с усилением

Используя подход Нейбера (сведение упругой задачи к упругопластической), получена формула для оценки максимальной деформации  $\varepsilon_{\max}$  в зоне концентрации напряжений в зависимости от номинальных напряжений  $\sigma_n$ , приложенных к сварному соединению и механических характеристик металла:

$$\varepsilon_{\max} = \left[ \frac{\sigma_n^2 \alpha_c^2 \varepsilon_T^m}{E \sigma_T} \right]^{1/(1+m)}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$ ,  $\varepsilon_T$  – предел текучести и соответствующая ему деформация ( $\varepsilon_T = \sigma_T/E$ );  $E$  – модуль упругости,  $m$  – показатель упрочнения материала (для стали 35ГС  $m = 0,095$ ).

Момент разрушения определяли, используя критерий В.А. Колмогорова:

$$\varepsilon_{\text{разр}} = L_p \sqrt{3}, \quad (4)$$

где  $L_p$  – ресурс пластичности (для стали 35ГС  $L_p = 0,171e^{-0,603\Pi}$ ),  $\Pi$  – показатель напряженного состояния  $\Pi = (1/\sqrt{3}) \cdot a_o^{1.5}$ .

Предложенная методика расчета несущей способности рассматриваемых соединений позволяет на основании визуального и измерительного контроля для каждого конкретного случая оценить величину концентрации напряжений, а также оптимизировать геометрические параметры соединений по критерию снижения концентрации напряжений в местах перехода шва к основному металлу.

В третьей главе предложена расчетная оценка несущей способности тавровых и нахлесточных сварных соединений закладных и соединительных изделий железобетона (рис. 3). Критерий предельного состояния сопротивления разрушениям указанных соединений, склонных разрушаться как вязко, так и хрупко, можно представить следующей зависимостью:

$$\left( \frac{\sigma_{\text{вязк}}}{\sigma_{\text{ср}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\text{хр}}}{\sigma_{\text{ср}}} \right)^2 = 1, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{вязк}}$ ,  $\sigma_{\text{хр}}$  – напряжение, приложенное к сварному соединению в условиях вязкого и хрупкого разрушения соответственно,  $\sigma_{\text{ср}}$  – прочность сварного соединения при вязком разрушении  $\sigma_{\text{ср}} = 2\sigma_B \cdot \psi \cdot k_{\eta\beta} / \sqrt{3}$ , ( $\psi = \sqrt{2F/B}$  – относительная

площадь наплавленного металла,  $F$  – площадь шва,  $B$  – толщина пластины;  $k_{\eta\beta}$  – коэффициент, зависящий от геометрических параметров сварных соединений,  $\sigma_B$  – предел прочности,  $\sigma_{kp}$  – прочность сварного соединения при хрупком

разрушении  $\sigma_{kp} = \frac{K_{lc}}{\sqrt{\pi l/2} \varphi_k \varphi_\lambda \varphi_{pl} \varphi_p}$  ( $K_{lc}$  – критический коэффициент интенсивности

напряжений, при котором реализуется хрупкое разрушение,  $l$  – величина непровара,  $\varphi_k$ ,  $\varphi_\lambda$ ,  $\varphi_{pl}$ ,  $\varphi_p$  – поправочные функции в условиях хрупких разрушений).

Несущую способность соединений с учетом концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному металлу рассчитывали по методу, описанному в главе 2. Концентрацию напряжений учитывали с помощью коэффициента концентрации  $\alpha_c = 1 + \frac{\alpha}{\sqrt{R/B1}} \sin \beta$ ,  $\alpha$  – коэффициент, который зависит от

соотношения  $B/B1$ ,  $B$  – толщина пластины;  $B1$  – максимальная ширина с учетом усиления в центральном сечении,  $R$  – радиус перехода от шва к основному металлу,  $\beta$  – угол наклона образующей шва. Диаграмма пластичности для стали 15ХСНД вычисляется по формуле  $L_p = 0,27e^{-0,7H}$ .

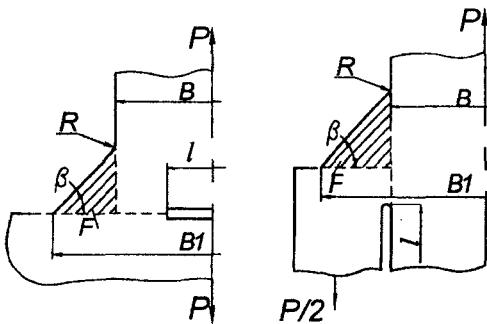


Рис. 3. Расчетные схемы таврового и нахлесточного соединений

В четвертой главе рассмотрены существующие методы контроля сварных соединений арматуры, выполняемых при монтаже железобетонных конструкций, включающие визуальный замер сварных швов, ультразвуковой контроль качества

сварных швов, а также обязательную проверку механическими испытаниями до разрушения контрольных образцов сварных соединений. Разрешается испытывать образцы реальных сварных соединений или плоские и цилиндрические образцы, вырезаемые согласно ГОСТ 6996-66 из реальных сварных соединений.

Прямое перенесение результатов испытаний вырезаемых образцов на натурные сварные соединения приводит к неоправданному увеличению их рабочих сечений и металлоемкости конструкции в связи с тем, что при вырезании образцов из сварных соединений изменяется соотношение их геометрических параметров, от которых зависит прочность механически неоднородных сварных соединений. Поэтому оценку прочности сварных соединений в конструкции  $\sigma_{B_{\text{св}}}$  по испытанию вырезанных из конструкции образцов  $\sigma_{B_{\text{обр}}}$  можно определить введением корректировочного коэффициента приведения  $K_{np}$ :

$$\sigma_{B_{\text{св}}} = K_{np} \sigma_{B_{\text{обр}}}; K_{np} = \frac{\beta_{\text{св}}}{\beta_{\text{обр}}} \cdot \frac{1 + (K_B - 1)K_{\chi_{\text{св}}}}{1 + (K_B - 1)K_{\chi_{\text{обр}}}} \quad (6)$$

где  $\beta_{\text{св}}$ ,  $\beta_{\text{обр}}$  – параметры, характеризующие потерю пластической устойчивости для сварного соединения в конструкции и вырезаемого образца;  $K_{\chi_{\text{св}}}$ ,  $K_{\chi_{\text{обр}}}$  – коэффициенты контактного упрочнения для сварного соединения в конструкции и испытываемом образце в зависимости от соответствующего значения относительной толщины  $\chi$ .

В пятой главе описаны технология проведения и результаты экспериментального исследования вязкой прочности сварных соединений стержней арматуры, приведена микроструктура сварных швов указанных соединений, подтверждающая наличие в них механической неоднородности, показаны основные направления и практические результаты внедрения проведенных исследований на строительных предприятиях г. Челябинска.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании теоретического и экспериментального анализа установлена количественная зависимость влияния механической неоднородности  $K_B$ , величины зазора между свариваемыми кромками  $a/d$  и угла их наклона  $\varphi$  на несущую

способность сварных соединений стержней арматуры железобетона, выполненных сварочными проволоками с более низкими прочностными характеристиками, чем основной металл. При одинаковой степени механической неоднородности статическую прочность указанных соединений можно повысить путем уменьшения наклона свариваемых кромок и зазора между ними.

2. При сравнении четырех вариантов разделок свариваемых кромок (косой, V-образной, V-образной несимметричной и X-образной) сварных соединений стержней арматуры предпочтение следует отдать сварному соединению с косой разделкой, так как при одинаковых геометрических параметрах ( $\phi$ ,  $a/d$ ) прочность данного сварного соединения выше и при этом значительно меньше объем наплавленного металла. Поэтому при ванной сварке стержней арматуры в горизонтальном положении нецелесообразно 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 наклоненными в одну сторону кромками с углом наклона не более  $40^\circ$  с наименьшим зазором между ними.

3. В стыковых сварных соединениях стержней арматуры и тавровых и нахлесточных соединениях закладных изделий в зоне перехода от шва к основному металлу имеет место концентрация напряжений, величина которой зависит от размеров соединяемых элементов, высоты усиления и ширины шва, остроты радиуса в месте перехода от шва к основному металлу и угла подъема усиления: при одинаковых параметрах шва особенно заметное снижение прочности происходит с увеличением высоты усиления и уменьшением радиуса перехода. Предложенная методика расчета несущей способности рассматриваемых соединений позволяет на основании визуального и измерительного контроля для каждого конкретного случая оценить величину концентрации напряжения, а также оптимизировать геометрические параметры соединений по критерию снижения концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному металлу.

4. Концентрация напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу в тавровых и нахлесточных соединениях зависит от угла наклона внешней грани угловых швов  $\beta$ . Концентрация напряжений существенно уменьшается в области оптимальных значений углов  $\beta_{\text{опт}}$ , при которых достигается максимальная несущая способность соединений в условиях вязкого разрушения. Для рассматриваемых соединений, выполненных ручной дуговой сваркой без проплавления стенок, углы  $\beta_{\text{опт}} = 60^\circ$ . С увеличением глубины проплавления  $h$  для тавровых соединений оптимальные значения углов смещаются в область больших величин ( $\beta_{\text{опт}} > 60^\circ$ ), для угловых швов нахлесточных соединений – оптимальные значения уменьшаются ( $\beta_{\text{опт}} < 60^\circ$ ).

5. Конструктивно-геометрические параметры угловых швов (соотношение катетов, глубина проплавления, объем наплавленного металла, радиус в вершине непровара) оказывают существенное влияние на прочность тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми неравнокатетными швами закладных изделий арматуры железобетона. Предложенная методика расчета оценки прочности тавровых и нахлесточных сварных соединений с непроваром в корне шва позволяет определить вероятность квазихрупких и хрупких разрушений для конкретного соединения с учетом действующих нагрузок.

6. Оценку прочностных характеристик сварных соединений по результатам испытания вырезаемых из них образцов необходимо проводить с учетом корректировочного коэффициента приведения, величина которого зависит от механической неоднородности сварного соединения, геометрических параметров сварных швов, компактности поперечного сечения образцов и реальных сварных соединений.

7. Разработанные расчетные методики оценки несущей способности сварных соединений стержней и закладных и соединительных изделий арматуры железобетонных конструкций дают возможность осуществить выбор рациональных конструктивно-геометрических параметров сварных швов, практическое использование которых обеспечивает значительную экономию трудовых и материальных ресурсов.

## **Публикации по теме диссертации**

### *Статьи, опубликованные в научных журналах из Перечня ВАК*

1. Усманова, Е.А. Комплексный подход к оценке прочности сварных тавровых соединений / Е.А. Усманова, М.В. Шахматов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 15. – № 34(210). – С. 54–57.
2. Шахматов, Д.М. Оценка статической прочности сварных соединений с использованием полос скольжения / Д.М. Шахматов, М.В. Шахматов, Е.А. Усманова // Сварка и диагностика. – 2011. – № 1. – С. 13–18.

### *Другие публикации*

3. Шахматов, М.В. Влияние геометрических параметров механически неоднородных сварных соединений стержней арматуры на их предельную несущую способность / М.В. Шахматов, Е.А. Усманова, Л.И. Хмарова // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 1. – Труды 1 Международного симпозиума. – М.: РАН. – 2010. – С. 55–62.
4. Усманова, Е.А. Оценка несущей способности сварных нахлесточных соединений / Е.А. Усманова, Л.И. Хмарова // Механика и процессы управления. – Труды XXXX Российского семинара. – М.: РАН. – 2010. – С. 47–54.
5. Усманова Е.А. Расчетная оценка прочности сварных соединений стержней арматуры железобетона / Е.А. Усманова, Л.И. Хмарова // Специальные методы сварки для модернизации в машиностроении: сборник докладов научно-технической конференции в рамках VII Международной специализированной выставки «Металлообработка. Сварка. Урал 2010». – Екатеринбург. – 2010. – С. 61–65.
6. Усманова, Е.А. Прочность сварных тавровых соединений закладных деталей железобетона / Е.А. Усманова, Л.И. Хмарова // Специальные методы сварки для модернизации в машиностроении: сборник докладов научно-технической конференции в рамках VII Международной специализированной выставки «Металлообработка. Сварка. Урал 2010». – Екатеринбург. – 2010. – С. 66–70.

7. Усманова, Е.А. Влияние геометрии лобовых швов нахлесточных соединений на их вязкую прочность / Е.А. Усманова // Инновационные технологии и модернизация в сварочном производстве: сборник докладов научно-технической конференции в рамках X Международной выставки «Сварка. Контроль и диагностика. Урал 2010». – Екатеринбург.– 2010. – С. 106–112.

8. Усманова, Е.А. Оптимизация геометрии угловых швов по критерию уменьшения концентрации напряжений в сварном соединении / Е.А. Усманова // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Орск. – 2011. – С. 105–107.