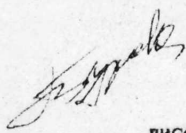


ГУРОВА Галина Германовна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ
МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СТЫКОВ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность: 05.02.11 - Методы контроля и диагностики в
машиностроении



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в НИИ бетона и железобетона

Научный руководитель - кандидат технических наук Воианов А. К.

Официальные оппоненты - доктор технических наук
с. н. с. Чабуркин В. Ф.

- кандидат технических наук
доцент Ремизов А. Л.

Ведущее предприятие - Центральный научно-исследовательский
институт строительных конструкций
им. В. А. Кучеренко.

Защита диссертации состоится "9" апреля 1998 г. на
заседании диссертационного совета Д 053.15.07 при Московском госу-
дарственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу:
107005, г. Москва, 2-ая Бауманская, д. 5.

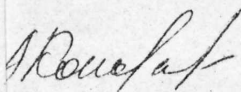
Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим вы-
слать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

3

29/79 1998 г.

1557686



А. В. Консвалов

Объем 1,0 п. л. Заказ 37
Гипография МВТУ им. Н. Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие промышленного и гражданского строительства неразрывно связано с обеспечением качества применяемых технологических операций при одновременном снижении ресурсоемкости возводимых конструкций. Сварка – один из основных технологических процессов строительной отрасли, поэтому на сварные элементы расходуется более четверти используемого стального проката. Постоянное совершенствование сварочной технологии не исключает образования в соединениях дефектов, которые могут вызвать возникновение аварийных ситуаций. В связи с этим, нормами на строительные конструкции предусмотрен обязательный контроль качества сварных швов.

Одним из методов контроля является ультразвуковая дефектоскопия, развитие и внедрение которой в нашей стране осуществляется на базе разработок: НИИмостов ЛИИЖТа, ЦНИИТмаша, МВТУ им. Н.Э.Баумана, ИЭС им. Е.О.Патона и др. Однако, несмотря на ее преимущества, для арматурно-сварочных работ железобетонных конструкций (ЖБК) возможность проведения ультразвукового контроля (УЗК) долго считалась сомнительной из-за периодичности профиля арматуры. В то же время дефекты в сварных, особенно монтажных, соединениях арматуры могут способствовать преждевременным разрушениям железобетонных сооружений. Это обусловило актуальность создания методов и средств УЗК, позволяющих с учетом специфики арматуры уверенно диагностировать качество ее монтажных стыков.

Диссертация содержит результаты двадцатилетних многоплановых исследований и разработок по УЗК сварных стыков арматуры, проведенных при непосредственном участии или под руководством автора по государственным и отраслевым программам важнейших работ в строительстве.

Цель работы заключалась в снижении брака и повышении надежности монтажных сварных стыков арматуры ЖБК за счет технологического обеспечения широкого применения УЗК их качества в условиях строительства.

Методы исследования включали натурные обследования причин аварий ЖБК, аспекты общей и прикладной акустики, физическое и вероятностное моделирование дефектов монтажных сварных стыков арматуры, экспериментальное моделирование условий эксплуатации стыков в ЖБК с проведением оценок с помощью УЗК их несущей способности, стандартные испытания. При этом использовалось современное дефектоскопическое, испытательное оборудование и ЭВМ для обработки результатов методами математической статистики и корреляционного анализа. В ряде случаев работа выполнялась совместно с сотрудниками МГТУ им. Н.Э.Баумана: докторами техн. наук Н. П. Алёшиным, В. Н. Волченко, кандидатами техн. наук А. К. Воцановым и Е. М. Комовым, а также сотрудниками НИИЖБ: кандидатами техн. наук И. Е. Евгеньевым и А. М. Фридманом, инженерами О. С. Черепановой, Е. Н. Бондарец и др.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1557686

Гурова Г.Г. Разработка тех



Научная новизна работы заключается в следующем. Экспериментально обоснованы допустимые площади дефектов монтажных сварных стыков арматуры ЖБК для статических нагрузок при отрицательных температурах, малоцикловых и многократно-повторных нагружений. Установлено, что эти площади могут нормироваться с помощью определенных коэффициентов к допустимой площади аналогичных дефектов для статического нагружения при положительной температуре.

Исследованиями методами акустики и на экспериментальных моделях доказана эффективность УЗК сварных стыков арматуры в зависимости от их типа по теневой или зеркально-теневой схемам. Выявленные закономерности влияния неровностей периодического профиля цилиндрического тела обеспечивают возможность расчета акустического тракта дефектоскопа для реализации УЗК в строительстве.

На основе анализа методами математической статистики и теории вероятности создана система оценки качества монтажных сварных стыков арматуры, позволяющая по ослаблению ультразвукового сигнала от дефектов дифференцировать их по степени пригодности к эксплуатации в ЖБК.

Практическая ценность заключается в реализации основных положений работы в нормативных и рекомендательных документах, в разработке и организации изготовления и внедрении специализированных ультразвуковых дефектоскопов: (УЗД-МВТУ, "Арматура I" и "Арматура 2"), пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) и устройств для их фиксации на арматурных стержнях, создании методологической базы по работе с этими приборами, организации обучения УЗК операторов-дефектоскопистов строительных организаций. Внедрение результатов работы осуществлено в масштабах отрасли при сооружении ГЭС, АЭС, гражданских, общественных и промышленных объектов.

На защиту выносятся следующие положения работы.

- обоснование допустимой площади дефектов в монтажных сварных стыках арматуры для нормальной эксплуатации ЖБК при положительной и отрицательной температурах, малоцикловых и многократно-повторных нагружениях;

- основные параметры УЗК монтажных сварных стыков арматуры по теневой и зеркально-теневой схемам с эмпирическими формулами расчета их акустического тракта;

- методология УЗК монтажных сварных стыков арматуры на базе обоснованных браковочных уровней оценки несущей способности и при этом стыков к эксплуатации в ЖБК;

- основные эксплуатационные характеристики средств УЗК монтажных сварных стыков арматуры, обеспечивающие оперативность проведения и достоверность его результатов в условиях строительства.

Апробация работы проведена на конференциях, симпозиумах, совещаниях и семинарах; в частности на V Всесоюзной конференции по сварке в строительстве, на Всесоюзных координационных совещаниях по бетону и железобетону в Москве, Волгограде, Куйбышеве и др.; ее результаты экспонировались на ВДНХ.

Публикации осуществлены в 17-ти печатных работах, в том числе в 2-х патентах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы (125 наименований) и двух приложений. Основное содержание изложено на 140 страницах машинописного текста, включающих 18 таблиц, и иллюстрировано 79 рисунками.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализированы крупные аварии ЖБК, возможные методы контроля качества монтажных сварных стыков арматуры, сформулированы задачи и показаны основные положения методик исследований.

Анализ происшедших за последние десятилетия аварий ЖБК, проведенный по материалам А. Н. Шкинева и результатам обследований с участием автора, показывает, что одной из их основных причин явилось неудовлетворительное качество сварных монтажных стыков арматуры. Так в процессе строительства и начального периода эксплуатации имели место обрушения покрытий меланжевого комбината и кузнечного цеха автомобильного завода, каркасов десяти и пятнадцати этажных жилых зданий, ферм цехов сталепроволочного и машиностроительных заводов, колонн конвейерных галерей и др. Характерные дефекты стыков - шлаковые включения, несплавления, поры, трещины, подрезы. Особенно катастрофичное положение выявилось при проверке последствий землетрясения в северных районах Армении. Выборочный контроль показал, что только 1,5% из монтажных сварных стыков арматуры являлись годными, в остальных наблюдались указанные дефекты, вызвавшие снижение несущей способности на 50-80%. В связи с этим в действующие нормативные документы введены требования по контролю качества монтажных сварных стыков арматуры, данные о котором должны содержаться в сертификате на ЖБК.

В настоящее время в основном, применяются монтажные стыки арматуры, сваренные в инвентарных (медных или графитовых) формах (типы С5-С13) и на остающейся скобе-накладке (типы С14-С19). Начали находить внедрение стыки, выполненные комбинированно в инвентарных формах на остающейся скобе-накладке (типы С24-С29). При этом применяют ванную и дуговые (ручную и полуавтоматическую) способы сварки стержней арматуры разных классов из тех или иных марок стали.

Неудовлетворительное качество указанных стыков предопределяется наружными и внутренними дефектами, причинами образования которых являются: нарушение технологии сварки, некачественные сварочные материалы, неправильная сборка под сварку, износ или несоответствие размеров инвентарных форм и скоб-накладок диаметрам стержней, низкая квалификация сварщика и др. Своевременное выявление внутренних дефектов по данным Н. П. Алешина, А. М. Фридмана, В. Я. Дулькина и др. возможно только неразрушающими методами контроля. Анализ частоты их появления, проведенный совместно с А. К. Воиновым и Е. М. Комовым, показывает, что в стыках типов С5-С13 наиболее распространены непровар корня или несплавление по разделке - 48% от общего числа дефектов, шлаковые включения составляют - 35%, поры - 14%, трещины - 3%; в стыках типов С14-С19 и С24-С29 непровары и несплавление шва встречаются в 58% случаях, шлаковые и неметаллические включения - в 28%, поры - в 11%; трещины - в 3%. В. Н. Волченко и Н. П. Алешиным предложено оценивать дефекты в монтажных стыках по показателю Q , равному отношению их суммарной площади в поперечном сечении стержня к его номинальной площади. Математической аппроксимацией по экспоненциальному закону установлено, что в сварных стыках арматуры в основном образуются дефекты с $Q = 20\%$.

До недавнего времени основным способом контроля монтажных сварных стыков арматуры являлись выборочные разрушающие испытания образцов-свидетелей. Однако, практика свидетельствует, что качество этих образцов в силу многих технологических и психологических факторов, не может достоверно, оперативно и экономично характеризовать качество реальных стыков. Более прогрессивный в этом отношении неразрушающий радиографический контроль в массовом строительстве широкого распространения не получил в виду высокой стоимости и повышенных требований к технике безопасности.

В то же время работами И. Н. Ермолова, В. Г. Щербинского, Н. П. Алешина, А. К. Гурвича и др. доказано, что внутренние дефекты, характерные для монтажных сварных стыков арматуры, уверенно выявляются и оцениваются с помощью УЗК. Более дешевый и производительней радиационных методов он не уступает им по чувствительности, безопасен и дает возможность проверять 100% всех соединений при высокой оперативности и портативности используемой при этом аппаратуры. Однако, геометрические особенности арматуры и формирования швов каждого типа ее монтажных стыков, характер, ориентация и допустимость в них различных дефектов накладывают свои требования на осуществимость и помехозащищенность УЗК. В связи с этим в диссертации решались следующие задачи: изучение влияния на несущую способность и разработка норм допустимос-

ти внутренних дефектов в монтажных сварных стыках арматуры; обоснование основных параметров УЗК монтажных сварных стыков арматуры; разработка технологии и средств для УЗК монтажных сварных стыков арматуры.

Для решения указанных задач проведен комплекс исследований с использованием ранее показанных методов.

Во второй главе обоснованы для монтажных сварных стыков арматуры допустимые площади внутренних дефектов с позиций анализа их влияния на несущую способность при разных условиях эксплуатации ЖБК.

Прочностные характеристики бездефектных монтажных стыков арматуры типов С5-С19, выполненных с использованием рациональных параметров сварки, по данным Г.И. Евстратова, Ю.Д. Быченкова и др., при статических и малоцикловых нагружениях, как правило, находятся на уровне характеристик исходной арматурной стали. Так понижение температуры вызывает повышение пределов текучести и прочности при некотором снижении пластичности. Однократное динамическое нагружение обуславливает прочность выше статической. При 100 циклах переменных нагрузок падение прочности составляет около 4%, а при 1000 циклах может достигать 13-15%. Исследования выносливости указанных стыков, проведенные С.В. Поляковым, Ф.Б. Бобровым, Ж.М. Гимервертом и др., свидетельствуют, что она значительно (на 25-70%) ниже выносливости самих арматурных стержней, так как на нее оказывают влияние подготовка к сварке, конструктивные особенности, точность сборки, несоосность и перелом осей и соотношение диаметров стыкуемых стержней, плотность прилегания к ним поверхностей инвентарных форм, скоб-накладок и т.д. Аналогичные закономерности получены автором и для бездефектных стыков типа С25.

В работах И.И. Макарова, А.К. Вощанова, Е.М. Комова, А.М. Фридмана, В.А. Медникова и др. отмечается, что краевые дефекты (непровары, несплавления, трещины в корне или боковой части шва) опаснее в 2-4 раза центральных дефектов (пор, шлаковых и неметаллических включений), находящихся внутри шва. Тем не менее для стыков типов С5-С10 проводились исследования несущей способности только с центральными дефектами, так как краевые выявляются визуально и для них УЗК не требуется. Испытания более ста образцов на статическое растяжение с последующим измерением площади смоделированных дефектов позволили получить для этих стыков уравнения связи с q их относительной прочности. Установлено, что минимально допускаемым нормам пределу прочности стыков, сваренных в инвентарных формах, соответствует пороговое значение $q_{п}^{ст} = 20\%$. При аналогичных испытаниях образцов стыков типов С14-С19 и С24-С29 изучалось влияние как центральных, так и краевых дефектов. Измерение их площади с учетом такого дифференцирования в более, чем

двухста изломах, позволили получить регрессионные зависимости, показавшие, что в этих стыках минимальному пределу прочности у центральных дефектов соответствует примерно в 1,5 раза большее значение σ , чем у краевых. Однако при некотором ужесточении требований к качеству для упрощения технологии контроля фактор влияния местоположения дефектов все же был исключен и установлена обобщенная регрессионная зависимость влияния σ на прочность стыков, из которой следует, что для типов С14-С19, С24-С29 $\sigma_{п}^{ст} = 2\sigma$.

В то же время известно (Я. М. Потак, Л. А. Копельман, Н. А. Махутов, В. И. Труфяков и др.), что помимо ослабления сечения шва, дефекты, являясь концентраторами напряжений, вызывают местное повышение уровня и неравномерность распределения главных напряжений, объемность напряженного состояния. Локализуя деформацию в ограниченном объеме материала они уменьшают уровень пластичности и вязкость металла, predispose его охрупчивание и увеличение скорости деформирования. Этим вызывается склонность сварных стыков арматуры с дефектами к хрупкому, малоцикловому и усталостному разрушениям.

Испытания образцов стыков типов С5 и С15 при отрицательных температурах показали, что в большинстве случаев до температуры -40°C если площадь дефектов не превышает $\sigma_{п}^{ст}$, у них наблюдаются вязкое и квазивязкое состояния и прочность не меньше, чем при положительной температуре. При понижении температуры до -60°C в основном возникает хрупкое состояние, при котором имеет место падение прочности примерно на 10%. Испытания при переменных нагрузках близких к циклическим, позволили установить, что в области малоцикловых нагружений от 1 до 1000 циклов эти же стыки качественные и с дефектами разрушаются по основному металлу практически при одинаковых значениях напряжений. После 1000 циклов характер разрушений меняется и они в основном проходят по сечению, совпадающему с дефектом. В то же время при дефектах с σ до 10% долговечность стыков почти не уменьшается, а при дефектах с $\sigma \geq 20\%$ при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов практически вдвое снижается их условный предел выносливости.

При обосновании по полученным результатам нормы допустимых дефектов использовалась модель В. Н. Волченко, в которую заложены вероятность появления дефекта размером $X = \sigma$ и вероятность потери работоспособности соединения, вызванной появлением этого дефекта. Установлено, что разброс значений прочности соединения $Y = \sigma_y$ при фиксированном размере дефекта, подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием m_y и средним квадратичным отклонением σ_y . Вероятность $F(y)$ снижения прочности соединения ниже нормативного значения описывается

как
$$F(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_n} e^{-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}} dy$$

а функция плотности вероятности появления соединений с прочностью ниже нормативной $f_n(x)$ как

$$f_n(x) = f_p(x) \cdot f(y)$$

где $f_p(x)$ — плотность вероятности появления дефекта размером x .

Нормы допустимых дефектов стыков арматуры устанавливались с учетом вероятностей перебраковки α_α и недобраковки α_β . В этом случае:

$$\alpha_\alpha = \int_{x_n}^{\infty} f_p(x) dx - \int_{x_n}^{\infty} f_n(x) dx; \quad \alpha_\beta = \int_0^{x_n} f_n(x) dx$$

В зависимости от нормативного размера дефекта $x_n = g_n$ изменяются величины и соотношения α_α и α_β . Для особо ответственных конструкций недобраковку приближают к нулю, что приводит к росту перебраковки. Для монтажных сварных стыков арматуры нормативный размер дефекта для статической нагрузки выбран из условия минимума $(\alpha_\alpha + \alpha_\beta)$ и принят равным $g_n^{ст}$, что соответствует точке пересечения минимального нормативного предела прочности с линией регрессии $\sigma = f(\rho)$. Ошибки оценки при этом примерно равны и составляют $\alpha_\alpha = \alpha_\beta = 0,035$. Это позволило с той же вероятностью назначить для стыков, эксплуатируемых при отрицательных температурах $g_n^{хл} = 0,9 g_n^{ст}$; малоцикловых нагружениях — $g_n^{мц} = g_n^{ст}$; усталостных (многократно повторных) нагружениях — $g_n^у = 0,5 g_n^{ст}$. Данные предельно допустимые размеры дефектов взяты за основу при дальнейшей разработке методик УЗК и соответствующих нормативно-рекомендательных документов.

В третьей главе обоснованы эффективность и основные параметры теневой и зеркально-теневой схем УЗК монтажных сварных стыков арматуры.

В настоящее время арматуру классов А-П и выше изготавливают периодического профиля с высотой выступов 1,5-2,5 мм в зависимости от диаметра d_n стержня. Это затрудняет ввод в него ультразвуковых колебаний из-за возникновения помех, мешающих выделению полезного сигнала от дефекта в стыке. Ограниченная цилиндрическая поверхность стержня также накладывает жесткие требования к помехозащищенности метода.

Изучение многих схем УЗК и вариантов ввода ультразвуковых колебаний в арматурный стержень показывает, что эффективными являются: для стыков типов С5-С13 теневая, а для стыков типов С14-С19 и С24-С32 зеркально-теневая схемы с использованием излучающего и приемного наклонных ЛЭП. Компенсация неровностей профиля осуществляется густой акустической смазкой. Исследованию теневой и зеркально-теневой схем контроля посвящены работы Д.С. Шрайбера, И.Н. Ермолова, Л.М. Яблоника, Б.А. Круглова, А.К. Гурвича и др. Анализ показывает, что для УЗК мон-

тажных сварных стыков арматуры по этим схемам целесообразен амплитудный метод, при котором признаком наличия дефекта является ослабление полезного сигнала. Однако чувствительность контроля, помимо таких традиционных факторов, как длина волны λ , диаметр пьезоэлемента $2a$, частота колебаний f расстояние L между ПЭП и т. д., зависит от возникающих из-за периодичности профиля флуктуаций на приемном ПЭП. Моделированием профиля арматуры в виде совокупности неровностей синусоидальной формы, чередующимися гладкими участками, установлено, что ультразвуковые волны в основном вводятся в стержень только на участках впадин профиля и рассеиваются на его выступах. При этом происходят потери энергии напрямую зависящие от геометрических параметров профиля. Условием стабильного ввода ультразвуковых колебаний в арматурный стержень является соблюдение соотношения:

$$a \geq t \cdot \cos \beta$$

где: t - шаг профиля, β - угол падения ультразвуковой волны.

С учетом данного условия и соизмеримости диаметра арматуры d_n с диаметром ультразвукового пучка, размеров дефектов $2b$ с диаметром $2a$ для рассматриваемых сварных стыков разработаны эквивалентные схемы расчета акустических трактов теневой и зеркально-теневой схем УЗК. Их анализ позволил выявить также необходимость учета искажений, возникающих из-за расфокусировки ультразвукового пучка на цилиндрической поверхности арматуры и зависящих от соотношения d_n и $2a$.

Экспериментальные исследования, проведенные на моделях центральных дефектов - "боковое сверление" для стыков типа С5-С13 позволили определить для теневой схемы эмпирическую зависимость

$$A_g / A_0 = e^{-k \frac{A_0}{\lambda \cdot z}}$$

где A_0 и A_g - соответственно амплитуды сигналов без дефекта и с дефектом; z - приведенное (по эквивалентной схеме) расстояние между излучающим и приемным ПЭП; k - коэффициент учета потерь энергии и искажений ультразвукового пучка, зависящий от диаметра стержня.

Установленные значения k позволяют предложить данную формулу для расчета акустического тракта при центральных дефектах с погрешностью не более 7-10% как по теневой, так и по зеркально-теневой схемам, в том числе, в области размеров $b \geq 0,1 d_n$. УЗК следует осуществлять при $f = 1,8-2,5$ МГц и $2a = 12-18$ мм, обеспечивающих надежный ввод ультразвуковых колебаний и максимальный уровень чувствительности. Для идентификации при УЗК стыков типов С14-С19 и С24-С29 экспериментально исследована их модель - "сегментная прорезь". Установлено, что в этом случае для зеркально-теневой схемы точнее эмпирическая формула,

$$A_g / A_0 = 1 - kb^2 / \lambda z$$

для которой результаты стабильны при $f = 1,8$ МГц и $2a = 18$ мм.

Широкая номенклатура диаметров арматуры обусловила, согласно данным Н.С. Урмана, оценку влияния кривизны ее поверхностей на помехоустойчивость акустического тракта ультразвука. На специальных образцах с проверкой на реальных арматурных стержнях выявлено, что без большой потери чувствительности можно принять единые радиусы кривизны для широких диапазонов диаметров арматуры.

В четвертой главе представлены основные положения методик УЗК монтажных сварных стыков арматуры, регламентирующие технологию контроля в производственных условиях.

В соответствии с принятыми схемами УЗК признаком наличия дефекта является коррелированное с его площадью ослабление амплитуды прошедшего сигнала. Анализ показывает, что при этом наибольшая чувствительность достигается при ее эталонировании на испытательных образцах, выполненных в виде бездефектных стыков, идентичных стыкам реального объекта. Соблюдение условий равновероятности обнаружения центральных и краевых дефектов, возможности их распознавания при необходимости дифференцированной оценки требует прозвучивания сечения всего стыка.

Экспериментально установлено, что для стыков типов С5-С13 эффективной является такая установка ПЭП по теневой схеме, при которой соосны боковые лучи диаграммы направленности с уровнем 0,7 и 0,8 от максимума при углах призма из оргстекла, равных 50 и 53 соответственно для стержней с $d_H = 32-40$ мм и $d_H = 20-28$ мм. В результате расстояния между зафиксированными в систему ПЭП составляют $L_r = 50 + 1,5 d_H$ и $L_g = 50 + 2,5 d_H$ соответственно для горизонтальных стыков типов С5-С7 и вертикальных - С8-С10. Исследования при контроле десятков образцов с d_H до 40 мм с искусственными ("боковым сверлением" и "сегментной прорезью") и естественными (порами, шлаковыми включениями и непроварами) дефектами показали, что они независимо от местоположения уверенно выявляются при смещении всей системы ПЭП в пределах $\pm 0,4 L_r$ или $\pm L_g$ от оси симметрии стыка. Минимальный размер дефекта определяется средним квадратичным отклонением разброса амплитуд сигналов и крутизной зависимости "амплитуда - дефект". Величина дефекта носит вероятностный характер и для стержня с $d_H = 40$ мм равна эквивалентному плоскодонному отражателю диаметром 7,3 мм. Признаком наличия центральных дефектов служит максимальное ослабление амплитуды сигнала при симметричном расположении ПЭП относительно стыка и уменьшение ослабления при их приближении к нему, а краевых - максимальное ослабление амплитуды сигнала при расположении одного из ПЭП непосредственно у стыка и уменьшение ослабления при его удалении. Причем

дефект расположен в нижней части шва, если максимальное ослабление получено при приближении ПЭП к нижней части шва, и в верхней, если максимальное ослабление имеет место при приближении ПЭП к верху шва.

Методика контроля стыков арматуры типов С5-С13 включает установку требуемого расстояния между ПЭП и проверку их соосности со стержнем. Перед контролем стыков устанавливают уровень опорного сигнала A_0 на испытательном образце. После этого дискретно сканируют ПЭП относительно оси стыка и фиксируют амплитуды сигналов (A_1, A_2, A_3) в трех точках, соответствующих максимальному приближению излучателя к шву, симметричному расположению ПЭП относительно шва и максимальному приближению приемника к шву. Затем определяют разности амплитуд сигналов $\Delta A = A_0 - A_{1,2,3}$ и находят среднюю величину. Если она меньше браковочного значения, то стык считают качественным, если равна или больше - бракованным. Для УЗК стыков типов С14-С19 и С24-С29 по зеркально-теневой схеме эффективнее настройка по центральному лучу, однако в целом методика контроля аналогична. Ее проверка на таких же образцах стержней, но с d_n до 70 мм, показало более высокую чувствительность к выявляемости краевых дефектов. Они обнаруживаются при симметричном расположении ПЭП относительно оси стыка, а центральные дефекты - при смещении системы на $\pm 0,3 L_r$ или L_b .

Выбор количественных значений браковочных норм ΔA_b ослабления осуществлялся по установленным регрессионным взаимосвязям, полученным по результатам контроля и вскрытия сотен стыков рассматриваемых типов. Соответствующие значения для $g_{н}^{ст} = g_{н}^{мц}, g_{н}^{хл}$ и $g_{н}^{у}$, включенные в нормативно-рекомендательные документы, приведены ниже.

Типы стыков	Схема контроля	Номинальные диаметры арматуры, мм	Браковочные уровни ослабления амплитуды, дБ		
			$\Delta A_{ст} = \Delta A_{мц}$	$\Delta A_{хл}$	$\Delta A_{у}$
С5-С13,	теневая	20-25	8	7	4
		28, 32	10	9	5
		36, 40	12	11	6
С14-С19,	зерка-	20-40	16	14	12
С24-С29	льно - теневая	50, 80	21	19	17

Использование разработанной В. Н. Волченко интервальной оценки достоверности результатов УЗК и разрушающих испытаний, позволило ввести в производственную практику трехбальную систему определения качества сварных стыков арматуры. В связи с чем, с учетом условий эксплуатации, баллом 1 оцениваются бракованные соединения, для которых $\Delta A \geq \Delta A_B$; баллом 2 - соединения, подлежащие усилению, для которых $\Delta A_B > \Delta A \geq 0,6 \Delta A_B$; баллом 3 - годные соединения с $\Delta A < 0,6 \Delta A_B$.

В главе 5 приведены основные характеристики разработанных средств УЗК монтажных сварных стыков арматуры, обеспечивающих его реализацию.

Арматура ЖБК, разработанные методики УЗК ее монтажных сварных стыков и производственные условия их осуществления обусловили специфические требования к созданию практических средств контроля. Так, взамен дефектоскопов типа ДУК-66П в МВТУ им. Н. Э. Баумана совместно с НИИЖБ при участии автора вначале был разработан и освоен серийный выпуск менее массивного и более (в 6-8 раз) чувствительного специализированного дефектоскопа УЗД-МВТУ с автономным питанием и калиброванным аттенуатором для измерения амплитуд непосредственно в децибелах. Его производственное применение позволило уточнить методики УЗК, подготовить материалы для разработки нормативных документов, оценить достоинства и недостатки работы на монтаже. В то же время, основное затруднение у операторов-дефектоскопистов вызывало определение наличия и характеристик дефектов по показаниям сигналов электронно-лучевой трубки. Поэтому дальнейшее развитие получили разработки дефектоскопов нового поколения "Арматур -1" и модернизированного за счет частичной автоматизации условий контроля "Арматура-2" с цифровой идентификацией дефектов. Их преимущества обеспечили им широкое внедрение в строительных организациях. К настоящему времени объем их поставок Апрельским НПО "Прибор" составил около 1000 шт. При этом для УЗК по теневой схеме арматуры с $d_H = 28-40$ мм приняты ПЭП с радиусом кривизны контактной поверхности $R_H = 22$ мм, для $d_H = 20-25$ мм с $R_H = 15,5$ мм; по зеркально-теневой схеме для всех диаметров арматуры - с $R_H = 25-30$ мм. Эти ПЭП снабжены фиксатором ввода ультразвукового пучка в центре впадины между ребрами арматуры, что обеспечивает его фокусировку, повышение уровня полезного сигнала и уменьшение помех.

Применяемые схемы УЗК сварных монтажных стыков арматуры предъявляют высокие требования к точности взаимной установки ПЭП на ее стержнях относительно стыка. Для этого разработаны специальные механические устройства обеспечивающие: сохранение требуемого расстояния между ПЭП и их взаимную самоцентрировку относительно продольной оси

стержня; возможность перемещения системы ПЭП вдоль и вокруг контролируемого стыка; постоянное усилие прижатия к стержням. Одно из них представляет систему рычажного типа. Удобное и надежное в работе оно, однако, не позволяет в ряде случаев компенсировать большие переломы оси арматурного стержня в стыке. Другое устройство "МАСКА" (механо-акустическая система контроля арматуры) позволяет осуществлять пропорциональную подстройку положения центрального луча диаграммы направленности приемного ПЭП, независимо от неточностей сборки стыка и компенсировать разность диаметров стыкуемых стержней.

Для первоначальной настройки системы дефектоскоп-ПЭП в качестве испытательного образца целесообразно использовать стержень из малоуглеродистой стали, в котором с периодом 8 мм выполнены проточки глубиной $h = 2,1...2,2$ мм. При контроле в производственных условиях испытательный образец должен представлять стык идентичный контролируемому стыку по диаметрам свариваемых стержней, их классу и марке стали, способу сварки и сварочным материалам, а также удовлетворять требуемым показателям прочности.

Акустические смазки для контроля монтажных сварных стыков арматуры должны обеспечивать хорошее смачивание поверхностей стержня и преобразователей, заполнение впадин профиля, удерживаться при контроле вертикальных стержней и легко удаляться после контроля. Исследованиями установлено, что этим условиям в наибольшей степени по сравнению с солидолом, смазкой ТКЗ и др., отвечают разработанные смазки в виде 9-12%-го раствора карбоксиметилцеллюлозы в воде - тип КСС-1 для положительных температур или с добавлением спирта - тип КСС-2 для отрицательных температур. Проверка показала, что за счет стабильных акустических свойств и вязкости они позволяют получить при толщине контактного слоя 2-8 мм ослабление амплитуды полезного сигнала на величину не более 2 дБ относительно его максимального уровня.

Одним из основных требований к средствам УЗК является работоспособность при любой температуре окружающей среды. По данным А. К. Гурвича, И. Н. Ермолова и по результатам практического применения на монтаже установлено, что при отрицательных температурах (ниже -5°C) резко снижается чувствительность контроля. Однако нами установлено, что в диапазоне температур $\pm 20^{\circ}\text{C}$ изменение показаний всех дефектоскопов типа УЗД-МВТУ и "Арматура" незначительно, при более низких температурах оно достигает 3-4 дБ, в связи с чем требуется их дополнительная защита из теплоизолирующего материала или местный подогрев. В работе также даны рекомендации по компенсационному уменьшению при отрицательных температурах расстояния между ПЭП и приведены соответствующие

значения для всех диаметров свариваемой на монтаже арматуры. Моделированием ряда эксплуатационных ситуаций также установлено, что при подогреве арматурного стержня до температуры 50-60 С все отрицательные явления, связанные с потерей чувствительности ПЭП устраняются.

В приложениях показаны объемы внедрения результатов работы, включая основные положения нормативно-рекомендательной документации по УЗК монтажных сварных стыков арматуры; приведены конкретные примеры его применения на крупных строительных объектах, программа и учебный план организованных курсов по обучению операторов-дефектоскопистов строительных организаций. Кроме того, дана оценка эффективности внедрения УЗК стыков арматуры с учетом рисков поставщика и потребителя.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Крупные аварии несущих конструкций ЖБК, вызванные дефектами монтажных сварных стыков арматуры, обуславливают актуальность широкого применения методов их оперативной диагностики, позволяющих получать достоверную информацию о качестве стыков в условиях строительной площадки. Анализ показывает, что этим требованиям в наибольшей степени отвечает УЗК наклонными пьезопреобразователями по теневой и зеркально-теневой схемам, соответственно осуществляемым для стыков, свариваемых в инвентарной форме, на остающейся скобе-накладке или с комбинированием инвентарной формы и скобы-накладки.

2. Статистической обработкой экспериментальных данных установлено, что дефекты в монтажных стыках арматуры снижают их предел прочности до минимального нормативного значения при площадях 20 и 23% от площади сечения арматурного стержня в зависимости от типа стыков. Анализ показывает, что данные пороговые значения площадей могут быть приняты за базовые браковочные уровни качества не только при положительных температурах, но и использоваться с коэффициентами 0,9; 1,0 и 0,5 соответственно для нормирования дефектов при статическом растяжении при отрицательных температурах, при малоцикловых и многократно-повторных нагружениях.

3. Оценка качества монтажных сварных стыков арматуры по показаниям УЗК стабильно осуществляется на базе установленных регрессионных связей пропорционального ослабления ультразвукового сигнала от площади дефектов, достигающего при са минимальном браковочном уровне не менее 4 дБ. В связи с этим разработанные методики контроля базируются на измерении амплитуд опорного (начального) и прошедшего через стык сигналов и оценке по их разности площади дефекта. Для всех монтажных сварных стыков арматуры выявлены браковочные уровни ослабления

амплитуд, соответствующие браковочным уровням площадей дефектов.

4. Исследованиями на моделях и реальных арматурных стержнях установлены закономерности влияния их периодического профиля и замкнутого сечения на ослабление амплитуды ультразвукового сигнала, показывающие, что практически вся его энергия вводится через впадины профиля, а потери оцениваются с помощью соответствующих коэффициентов, которые должны учитываться при расчете акустического тракта ультразвука по реализуемым теневой и зеркально-теневой схемам контроля. С учетом численных значений этих коэффициентов разработаны эмпирические формулы расчета акустического тракта по обеим схемам.

5. Моделированием взаимодействия поверхностей наклонных ПЭП и арматурных стержней установлено, что для широких диапазонов их диаметров возможно применение ПЭП с единой кривизной вогнутой контактной поверхности. Дополнение конструкции этих ПЭП специальным регулируемым упором позволяет гарантированно вводить ультразвуковые колебания в центре впадин периодического профиля арматуры и фокусировать их диаграмму направленности независимо от расположения ПЭП на стержне.

6. Изучение выявляемости дефектов при УЗК монтажных сварных стыков арматуры показывает, что перемещение ПЭП при их фиксированном расположении относительно стыка арматуры в соответствии с применяемыми теневой или зеркально-теневой схемами контроля позволяет уверенно дифференцировать помимо площадей дефектов их месторасположения по сечению стыка. Разработаны специальные механические устройства, обеспечивающие с постоянным усилием прижатия требуемую точность установки и перемещения ПЭП на арматурных стержнях.

7. Исследования свойств смазок для создания акустического контакта между ПЭП и арматурными стержнями показывают, что стабильность и высокое качество обеспечивают разработанные смазки типа КСС-1, а при температуре ниже -50°C - типа КСС-2, содержащие соответственно в воде или спиртовом растворе 9-12% карбоксиметилцеллюлозы. По сравнению с другими видами смазок (типа солидола, ТКЗ и др.) они могут использоваться для широкой номенклатуры диаметров арматуры.

8. Для практической реализации УЗК монтажных стыков арматуры разработаны специализированные портативные дефектоскопы УЗД-МВТУ и "Арматура 1 и 2" с автономным питанием и калиброванным аттенуатором. При этом, последние дефектоскопы не имеют электронно-лучевой трубки и осуществляют цифровую идентификацию наличия и характеристик дефектов. Моделирование условий эксплуатации дефектоскопов показывает, что для сохранения их высокой чувствительности при температуре ниже -20°C они должны быть помещены в футляр из теплоизолирующего материала.

9. Аналитически и экспериментально установлено, что для эталонирования чувствительности разработанного комплекса средств УЗК монтажных сварных стыков арматуры в производственных условиях в качестве специальных образцов эффективнее использовать бездефектные стыки, сваренные по технологии эксплуатируемых соединений. Для первоначальной настройки чувствительности системы дефектоскоп - ПЭП в лабораторных условиях могут быть применены как арматурные стержни, так и изготовленные из той же марки стали образцы с периодическими кольцевыми проточками. Ослабление чувствительности этой системы при температуре ниже -20°C компенсируется уменьшением расстояния между ПЭП или предварительным подогревом арматурных стержней в зоне контроля до температуре $+50-60^{\circ}\text{C}$.

10. Статистической обработкой результатов УЗК и вскрытия монтажных сварных стыков арматуры установлена регрессионная взаимосвязь амплитуды ультразвукового сигнала и прочностных характеристик стыков, позволяющая с 90%-ной достоверностью оценивать по трехбалльной системе их пригодность к разным условиям эксплуатации железобетонных конструкций с дифференцированием на "годные", "подлежащие усилению", "бракованные".

11. Проведенный комплекс исследований позволил обосновать технико-экономическую целесообразность широкого применения УЗК качества монтажных сварных стыков арматуры ЖБК. Полученные результаты включены в нормативно-рекомендательные документы, обеспечившие использование разработанных методик и средств при строительстве промышленных, общественных, гражданских и других объектов. Организованные при этом курсы способствуют подготовке квалифицированных операторов-дефектоскопистов по УЗК в масштабах отрасли. Указанное комплексное внедрение обусловило снижение вдвое брака при сварке стыков арматуры и, как следствие, повышение их надежности. Оценка эффективности с учетом рисков поставщика и потребителя показывает, что стоимость УЗК не менее, чем в два раза ниже стоимости разрушающих испытаний, а его производительность составляет более 100 стыков в смену.

Основные положения диссертации отражены в публикациях:

1. Гурова Г.Г. Опыт применения ультразвукового контроля качества сварки арматуры //Повышение качества сварной арматуры железобетонных конструкций. - М.: НИИЖБ, 1977. - С. 57-61.

2. Фридман А.М. и др. Сварка порошковой проволокой и ультразвуковой контроль стыков арматуры железобетонных конструкций /А.М. Фридман, Г.Г. Гурова, Н.П. Алешин, А.К. Воианов и др. //Промышленное строительство. - 1978. - N 2. - С. 12-14.

3. Фридман А.М., Гурова Г.Г., Воцанов А.К. Ультразвуковой контроль качества сварных соединений арматуры железобетонных конструкций, выполненных ванной сваркой в соответствии с ГОСТ 14098-68: Пристендовый листок ВДНХ. - М.: ПЭМ ЦИНИС, 1979. - 4 с.

4. Гурова Г.Г., Павлов В.П., Уварова Л.Н. Опыт применения ультразвукового контроля качества сварной арматуры //Новые виды арматуры и ее сварка: Тез. докладов Всесоюзного совещания, г.Волгоград, 10-12 сентября 1982 г. - М., 1982. - С.208-211.

5. Воцанов А.К., Комов Е.М., Гурова Г.Г. Повышение достоверности ультразвукового контроля сварной арматуры //Новые виды арматуры и ее сварка: Тез. докладов Всесоюзного совещания, г.Волгоград, 10-12 сентября 1982 г. - М., 1982. - С.191-194.

6. Гурова Г.Г., Павлов В.П. Эффективность ультразвукового контроля качества сварных соединений в зависимости от диаметра арматуры //Пути снижения материалоемкости и трудоемкости сварочных работ в строительстве: Тез. докл. V Всесоюзной конференции, г.Макеевка, 11-13 ноября 1983 г. - М., 1983. - С.78-80.

7. Гурова Г.Г. Ультразвуковой контроль качества сварных стыков арматуры железобетонных конструкций стыков арматуры железобетонных конструкций на монтаже //Развитие методов и средств неразрушающего контроля параметров армирования железобетона: Тез. докл. Научно-координационного совета по бетону и железобетону. - г.Куйбышев, 1987. - С.11-12.

8. Гурова Г.Г., Бирюков Е.Д., Гусев С.В. Ультразвуковой контроль качества сварных соединений стержней арматуры железобетонных конструкций на монтаже с использованием специализированного дефектоскопа "Арматура-1": Пристендовый листок ВДНХ. - М.: ПЭМ ВНИИМС, 1987. - 2 с.

9. Патент 1504615 (Россия). Способ ультразвукового контроля стыковых сварных соединений протяженных изделий с периодическими выступами. /Е.М.Комов, А.К.Воцанов, Г.Г.Гурова, Н.К.Егорова. - Заявл. 18.01.88 N 4365440/25-28 //Б.И. - 1989. - N 32.

10. Патент 1604003 (Россия). Вещество для создания акустического контакта при ультразвуковом контроле. /Е.М.Комов, Г.Г.Гурова, А.В.Землянский. - Заявл. 30.03.88. N 4421092/22-28 //Б.И. - 1990. - N3.

11. Гурова Г.Г. Организация работ по контролю качества сварки арматуры на монтаже. - М.: ЗИ АО "Росгострой", 1992, - С.5-9.

12. Гурова Г.Г. Контроль качества сварных соединений арматуры и закладных деталей //Тез. докл. конференции межрегиональной ассоциации "Железобетон" - М., 1994. - С.12-13.