

Кузнецова В.В.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СВАРКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КРЕСТООБРАЗНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРЫ

Целью настоящей работы является создание и исследование конечно-элементных моделей крестообразных соединений арматуры диаметрами до 10 мм, сваренных дуговым способом в среде активного газа CO_2 и контактно-точечным. Требуется выяснить, будут ли сварные соединения удовлетворять условиям прочности по первой группе предельных состояний на действие расчетных нагрузок. Рассматриваемая задача была вызвана необходимостью модификации процесса сварки пространственных арматурных каркасов в условиях предприятия-изготовителя без переоборудования цеха.

При механических испытаниях сварных соединений сложно наблюдать за процессами, протекающими в образце вследствие их скоротечности. Кроме того, нельзя однозначно оценить влияние различных видов дефектов на работоспособность конструкции в целом. При компьютерном моделировании эти задачи решаются быстрее, с меньшими затратами и на более высоком техническом уровне. Применение математических методов и математического моделирования сварочных процессов превратилось в мощный инструментальный исследования и познания процессов, происходящих в сложных технологических системах, позволяющих не только получить формализованное описание их основных закономерностей, но и эффективно управлять ими.

Сварные соединения в настоящее время являются наиболее распространенными по сравнению с другими типами неразъемных соединений. Это объясняется тем, что они наиболее прочные, технологичные и экономичные. В соответствии с требованиями нормативных документов стыковку крестообразного соединения следует осуществлять контактной точечной сваркой. Однако процесс сварки усложняется тем, что сварочные клещи из-за своих габаритных размеров снижают производительность труда и делают работу более трудоемкой. При производстве сварных металлоконструкций все более широкое применение находят способы сварки с управляемым каплепереносом электродного металла, такие как, дуговая сварка полуавтоматом в среде защитных газов. Сварка в смеси газов положительно сказывается на технологических свойствах сварочной дуги (повышая стабильность ее горения), происходит снижение размеров брызг и уменьшение потерь на разбрызгивание, уменьшается выпуклость шва. Однако возможности дуговой сварки в производстве соединений арматуры из малых диаметров и вопрос влияния остаточных напряжений и деформаций на прочность соединений мало изучены и до конца не раскрыты. Накоплен лишь небольшой опыт использования дуговой сварки для соединения изделий из тонколистовой стали.

Существующие в настоящий момент математические методы и модели в основном созданы для широко используемых и глубоко изученных способов сварки (ручная дуговая сварка, механизированная сварка и автоматизированная сварка под слоем флюса). Расчетный анализ крестообразных соединений из стальной арматуры малых диаметров, сваренных дуговым способом в среде активного газа CO_2 и контактно-точечным, до настоящего времени не выполнял-

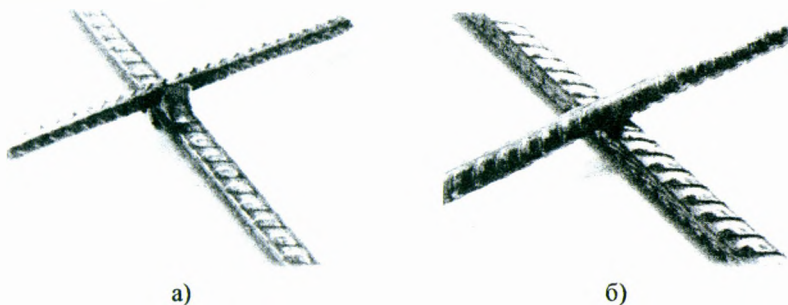
ся, а определялся только на основе эксперимента. В связи с этим представляется актуальной разработка при помощи компьютерных программ модели поведения сварного соединения из стальной арматуры, включая процессы деформации и разрушения материала, с определением мест начала разрушения и траекторий роста трещин непосредственно в процессе моделирования. Объединение расчетного и экспериментального подходов позволит выйти на новый уровень оценки прочности и работоспособности исследуемых сварных соединений.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования служили сварные крестообразные соединения из стальной арматуры диаметрами от 4 до 10 мм, сваренные контактно-точечным и дуговым способом сварки в среде активного газа CO_2 .

Исследования выполняли методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical. Статистическую обработку расчетных данных производили при помощи процессора «Excel».

Результаты исследований. Для расчета сварных конструкций существует много методик, пособий, но самым оптимальным методом сегодня является метод конечных элементов (далее МКЭ). Расчет МКЭ позволяет получить более точную, по сравнению с сопроматом или другими приближенными методиками, оценку напряженно-деформированного состояния в сечениях в зависимости от геометрии и схемы приложения усилий.

Объектами исследования служили узлы, выполненные в виде крестообразного соединения из арматуры в месте ее пересечения двумя видами сварки: дуговым способом в среде активного газа CO_2 и контактно-точечным (рисунок 1). Для крестообразных соединений использовалась стальная арматура диаметрами $d = 4, 5, 6, 8$ и 10 мм.



а) дуговой сваркой полуавтоматом в среде активного газа CO_2 ,

б) контактно-точечной сваркой

Рисунок 1 – Крестообразные соединения арматуры $d 4 \times 6$ мм, выполненные

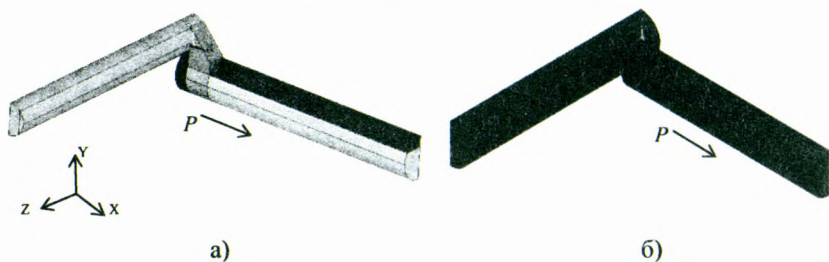
Для выяснения причин разрушения крестообразных сварных соединений из арматуры малых диаметров в процессе нагружения были созданы конечно-элементные модели этих соединений средствами расчетно-программного комплекса ANSYS Mechanical.

Разработка математической модели включала следующие основные этапы: создание геометрии модели, задание физических свойств материалов, начальных и граничных условий (механические нагрузки, контактные характеристики), формирование алгоритма расчета.

Особенностью сварных соединений является возможность проявления в небольшом объеме, практически в одной точке, целого ряда факторов, осложняющих оценку опасности разрушения: острых конструктивных концентраторов напряжения, границ зон с различными свойствами, технологических дефектов, остаточных напряжений, градиентов температуры. С одной стороны расчетная схема должна описывать закономерности натурной конструкции с требуемой точностью, т.е. быть адекватной по отношению к ней, а с другой стороны быть наиболее простой.

Расчетную схему сварного соединения получили из реальной конструкции, освобождая ее от менее существенных признаков при сохранении главных: размеров и очертания контура, механических и деформативных свойств материалов, характера нагружения, соединения и закрепления элементов. Исходными данными для построения расчетной схемы модели явились геометрические размеры сварных соединений, катет сварного шва и вид их сварки. Геометрические размеры расчетной модели были получены путем обмера крестообразных соединений, использованных в дальнейшем при натуральных испытаниях на растяжение, сваренных дуговым способом полуавтоматом в среде активного газа и контактно-точечным. На основании этих данных была построена геометрическая и конечно-элементная модели крестообразного сварного соединения.

Рассматриваемые системы состояли из двух взаимно перпендикулярных стержней арматуры длиной 10 см, соединенных сваркой. Конструкции сварных соединений симметричные и имели две плоскости симметрии по осям XU и YZ , поэтому расчеты проводились для одной четвертой части рассматриваемых системы. Общее количество объемов крестообразного соединения, сваренного дуговой сваркой, составило 36. Рассматриваемая часть системы соединения была разбита на 9 объемов. При контактно-точечной сварке общее количество объемов составило 12, для рассматриваемой части системы – 3.



а) дуговая сварка в среде CO_2 , б) контактно-точечная сварка, P – прикладываемая нагрузка
Рисунок 2 – Геометрическая модель крестообразного соединения

Объемы были разбиты на конечные элементы с помощью тетраэдральных квадратичных 10-узловых конечных элементов Solid 187, имеющих 3 степени свободы в каждом узле.

С учетом исходных данных приняли следующие граничные условия для соединений – симметрия на плоскостях симметрии, закрепление одной точки по оси Y . В качестве нагрузки прикладывалось равномерно распределенное давление P , действующее по оси X . Распределение перемещений, напряжений и деформаций по конечному элементу – квадратичное. В диапазоне допустимых нагрузок не должна происходить общая или местная потеря устойчивости. Пола-

галось, что материал изотропный и упругий. Для расчета интенсивности напряжений задавались физические и механические свойства арматурной стали и сварного шва, представленные в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Параметры для расчета интенсивности напряжений

Материал	Марка	Временное сопротивление R_m , МПа	Предел текучести σ_y , МПа	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ
Арматурная сталь, класс S500	Ст3пс	600	500	2,1·10 ⁵	0,3
Наплавляемый металл	Св-08Г2С	550	450		

Одним из наиболее важных этапов конечно-элементного анализа является построение сетки конечных элементов. Перед созданием конечно-элементной сетки выделяли предполагаемые области концентрации напряжений. Мелкую сетку накладывали там, где ожидался большой градиент деформаций или напряжений, в нашем случае это сварной шов, область прилегающего к нему арматурного стержня и зона стыка, где локализуется пластическая деформация, а крупная сетка применялась в зонах с малоизменяющимися относительными деформациями или напряжениями.

Общий вид конечно-элементной модели конструкции крестообразного соединения, сваренного дуговым способом, состоял из 11 тыс. элементов, количество уравнений при расчете составило 43 тыс.; для контактно-точечного способа количество элементов составляло 7 тыс., количество уравнений – 35 тыс.

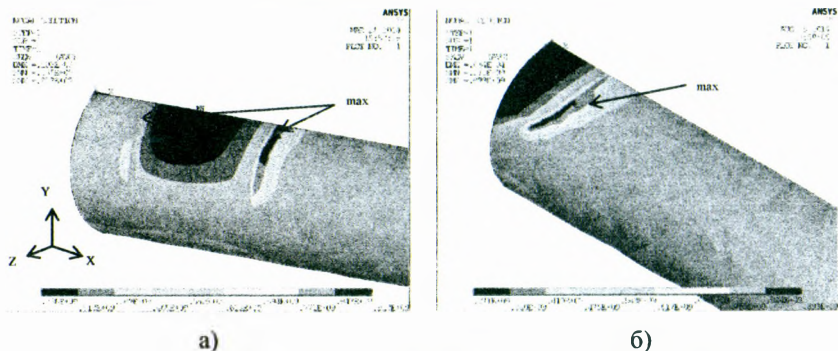
Согласно нормативным документам временное сопротивление крестообразных соединений стальной арматуры должно быть не ниже 525 МПа [4]. Соответственно, нагружение модели проводили распределенной нагрузкой, которая составила $P = 525$ МПа и прикладывали вдоль оси X согласно расчетной схеме (рисунок 2) [5].

Анализ выполнили с учетом геометрической нелинейности. Серии расчетов проводили для случаев соединения различных диаметров стержней арматуры и способов сварки. При анализе результатов расчета для пластичных материалов за предельное напряжение принимали предел текучести $\sigma_u = \sigma_y$ [2]. В качестве критериев оценки напряженного состояния принимали характер распределения эквивалентных напряжений по всей плоскости соединения, локализацию максимальных эквивалентных напряжений в зоне стыка и размер зоны, в которой эквивалентные напряжения превышают предел текучести основного металла.

Всего было рассчитано 50 типов сварных соединений. Принципиальная схема распределения напряжений была одинакова во всех случаях. Различия наблюдались лишь в значении напряжений. Наибольшее внимание следует уделить напряженно-деформированному состоянию в зоне сварных швов. Более ясная картина возникающих напряжений проявилась при более близком рассмотрении полей эквивалентных напряжений соединения и зоны сварного шва (рисунок 3).

Выявлено увеличение напряжений в местах присоединения материала сварного шва с основным металлом. В первом случае (при дуговой сварке) разгрузка наблюдалась посередине примыкания сварного шва на стержне арматуры, во втором случае (контактно-точечная сварка) в зоне стыка арматурных стержней, где локализуется пластическая деформация. Однако следует заметить, что данная величина концентрации напряжений не оказывала существенного влияния на несущую способность сварных соединений. Напряжения в центре сварного

соединения начинают расти только тогда, когда напряжения в основном материале приближаются к границе предела текучести.

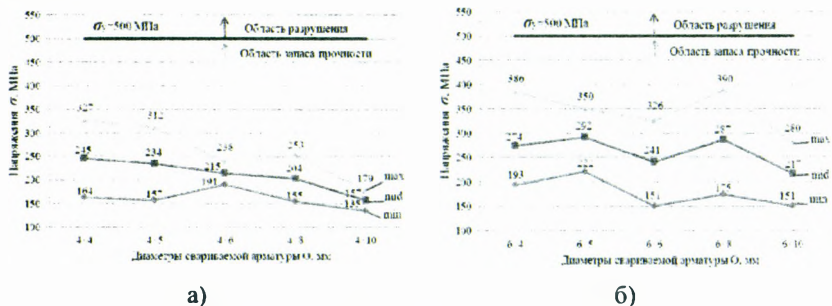


а) дуговая сварка в среде CO₂, б) контактно-точечная сварка
Рисунок 3 – Градиент распределения деформаций в продольной арматуре сварного соединения по оси XZ от действия растягивающих нагрузок

Установлено, что в сварном шве распределение напряжений не являлось равномерным. Наибольшая значительная концентрация напряжений наблюдалась в местах переходов от шва к основному металлу и колебалась от 542 до 923 МПа. Эти участки стыкового соединения являлись наиболее уязвимыми при приложении растягивающих нагрузок, т.к. в этих зонах напряжения значительно превышали предел текучести основного металла. В центре сварного шва значения напряжений по мере перехода к границе соединения с арматурой изменялись от 236 до 410 МПа. Таким образом, в данном случае запас прочности сварных соединений составил от 20 до 25 %. Увеличение фрагментации расчетной схемы не оказало влияния на сходимость конечных результатов.

Аналогичным образом были сгенерированы конечно-элементные модели для различных видов сварки и диаметров привариваемой поперечной арматуры крестообразных соединений – 4, 5, 6, 8, 10 мм.

На рисунке 4 приведены минимальные, средние и максимальные значения напряжений для каждого типа рассматриваемого крестообразного соединения арматуры.



а) дуговая сварка в среде CO₂, б) контактно-точечная сварка
Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения, возникающие в сварном крестообразном соединении

Выявлено, что в большинстве случаев напряжения уменьшались с увеличением диаметра привариваемой арматуры. В крестообразных соединениях, сваренных дуговым способом, возникающие напряжения на 15–40 % ниже, чем у соединений, сваренных контактно-точечной сваркой. При контактно-точечной сварке в зоне стыка пластическая деформация приводит к повышению прочности материала (деформационное упрочнение) и снижению степени неоднородности его состояния. Возможно, поэтому значения эквивалентных напряжений во втором случае сварки получились немного выше, чем в первом. При дальнейшем повышении нагрузки напряжения росли прямо пропорционально увеличенной нагрузке. При приложении к соединению разрывной нагрузки [5, 6] значения напряжения на границе соединения и сварного шва достигали предела текучести и, соответственно, происходило разрушение соединения.

Полученные результаты по значению напряжений и деформаций адекватно сопоставимы с экспериментальными лабораторными измерениями. Установлено, что запас прочности для такого типа соединений составлял от 30 до 60%.

Заключение

С помощью программ трехмерного моделирования разработаны пространственные конечно-элементные модели крестообразных соединений арматуры малых диаметров, сваренных различными способами. Уточнено напряженно-деформированное состояние таких соединений в условиях упруго-пластической стадии нагружения.

Анализ полученных эквивалентных напряжений в узлах и деталях конструкции сварного шва показал, что для рассмотренных условий нагружения они не превышали допустимых для всех диаметров. В крестообразных соединениях, сваренных дуговым способом, возникающие напряжения на 15–40 % ниже, чем у соединений, сваренных контактно-точечной сваркой. Показано, что в околошовной зоне сварного соединения возникают остаточные напряжения, достигающие предела текучести. Выявлено, что напряжения увеличивались по мере перехода к границе соединения с арматурой, однако находились в области передела запаса прочности. Установлено, что запас прочности для такого типа соединений составлял от 30 до 60%.

Расчетные значения напряжений на поверхности сварного узла удовлетворительно согласуются с данными натуральных испытаний – разрыв происходит по арматуре в зоне сопряжения сварного шва и арматуры [5, 6]. Это подтверждает корректность выбора расчетных схем и достоверность получаемых результатов численного моделирования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Харевич, Т.В. Организация сварочного производства: день сегодняшний / Т.В. Харевич // Республиканская строительная газета. – 2012. – № 24 (477). – С. 6.
2. Эрдеди, Н.А. Сопротивление материалов: учебное пособие для бакалавров / Н.А. Эрдеди, А.А. Эрдеди. – М: ООО «Кнорус», 2012. – 160 с.
3. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования / Н.П. Блещик [и др.]; под общ. Ред. Т.М. Пецольда и В.В. Тура. – Брест: БГТУ, 2003. – 380 с.
4. Изделия арматурные сварные для железобетонных конструкций. Технические условия: СТБ 2174-2011. – Введ. 2011-02-23. – Минск: Госстандарт, 2011. – 46 с.
5. Врублевская, В.В. Исследование прочности крестообразных соединений из стальной арматуры малых диаметров, выполненных дуговой сваркой полуавтоматом в среде активного газа / В.В. Врублевская, А.А. Васильев, Д.М. Гурский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 35–41.
6. Врублевская, В.В. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния сварного соединения арматурных стержней / В.В. Врублевская, А.О. Шимановский, А.А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 60–63.