

М 402642

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

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

На правах рукописи

ШАФЕРМАН Илья Михайлович

УДК 624.21.014.25/26.001.5

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОНТАЖНЫХ
БОЛТОВЫХ СТЫКОВ МОСТОВЫХ БАЛОК

Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1983 г.

НА ДОМ
НЕ ВРАЩАЕТСЯ

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте транспортного строительства (ЦНИИС Минтрансстроя)

Научный руководитель

- доктор технических наук,
профессор Григорьянц А.Г.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук,
профессор Бершинский А.В.

- кандидат технических наук
Васильев А.И.

Ведущее предприятие: Государственный Орден Трудового
Красного Знамени проектно-исска-
тельный институт по проектированию
и изысканиям больших мостов
(Гипротрансмост)

Защита диссертации состоится "24" марта 1983 г.

на заседании специализированного Совета Д053.15.07 при Мос-
ковском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.
Н.Э.Баумана по адресу 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный
печатью, просим выслать по у

С диссертацией можно о
им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "

Ученый секретарь
специализированного Совета

доктор технических наук,
профессор

Л. - 99237

Подп. к печати 4. II. 83

Заказ № 266

M 402 642



1402642

Шаферман И.М. Разработка и

ШАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно решениям XXVI съезда КПСС одной из основных задач развития народного хозяйства является повышение эффективности использования металла за счет внедрения прогрессивных конструктивно-технологических решений. В мостостроении выполнению данной задачи способствует навесной монтаж пролетных строений, позволяющий при их сборке существенно сократить расход стали на вспомогательные сооружения.

В нашей стране до настоящего времени при навесном монтаже основным типом стыков мостовых балок являются стыки, полностью собранные на накладках с фрикционными соединениями на высокопрочных болтах. Однако ослабление отверстиями сечения поясов, наличие в их соединениях болтов, шайб, гаек и развитых по длине накладок значительно увеличивают массу пролетного строения. Перспективнее в этом отношении комбинированные стыки, в которых пояса сварены встык, а с помощью накладок и высокопрочных болтов соединена только стенка.

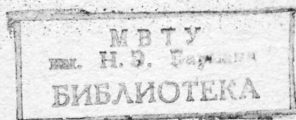
Сопоставление показывает, что применение комбинированных болтосварных стыков взамен болтовых в мостовых балках обеспечивает сокращение металлоемкости пролетного строения более чем на 20 %, а общих трудозатрат на заводское изготовление и сборку при монтаже - более чем на 30 %, при этом экономический эффект составляет около 20 % от затрат на его строительство. В связи с этим возникла необходимость в проведении всесторонних исследований, актуальность которых, помимо названных факторов, определялась отсутствием расчетно-теоретического аппарата для проектирования болтосварных стыков и неизученностью технологии навесной сборки балок с помощью этих стыков.

Настоящая работа выполнена в соответствии с программой по решению отраслевой научно-технической проблемы транспортного строительства 0.55.00.193 (задание 03.05.02, этапы Т2, Т7, Т15) по плану научно-исследовательских работ ЦНИИСа.

Цель работы заключалась в обосновании возможности широкого применения болтосварных стыков в мостовых балках с разработкой рекомендаций по методам их расчета, конструкции и технологии сборки при навесном монтаже пролетных строений мостов.

Методы исследования включали математическое моделирова-

I



1402.642

ние схем деформирования комбинированных болтосварных стыков и работы в них сварного соединения многолистового пояса; численные расчеты на ЭВМ; экспериментальное моделирование на крупномасштабных (высотой до 2 м и длиной до 18 м) балках, фотоупругих и стальных образцах поведения стыка в условиях навесного монтажа и эксплуатации вплоть до предельного состояния; различные стандартные испытания.

Исследования проводились в лаборатории металлических мостов, заведующий которой, канд. техн. наук К.П. Большаков, являлся научным консультантом диссертационной работы. На отдельных этапах в работе принимали участие кандидаты технических наук В.Ю. Шишкин (НИИ мостов), Л.Л. Старчевская, В.П. Егоров, канд. физ.-мат. наук А.З. Авербух (ЦНИИС), инженеры Н.Н. Рудомазин, З.А. Макарова, Ю.Д. Елчов (Гипротрансмост), Э.М. Гитман, Е.Н. Трошко, А.С. Бейвель (ЦНИИС).

Научная новизна работы состоит в раскрытии, путем анализа схем деформирования, аналогии в поведении болтосварных стыков, элементов с комбинированным сечением и с остаточными напряжениями, использование которой совместно с методами теории пластичности позволяет достоверно оценить несущую способность стыков при нелинейном деформировании составляющих их соединений с учетом остаточных сварочных напряжений.

Решением математической задачи теории упругости, исследованиями методом фотоупругости и испытаниями на усталость доказано, что одной из основных причин преждевременного разрушения сварных стыковых соединений многолистовых поясов в монтажных, в частности, болтосварных стыках балок является ранее неизвестный концентратор напряжений в виде места пересечения шва и зазора между листами, устранение которого повышает выносливость соединения и всего монтажного стыка в целом.

Практическая ценность работы. Обоснован один из перспективных путей экономии металла и трудозатрат при строительстве пролетных строений мостов, заключающийся в широком применении при навесном монтаже комбинированных болтосварных стыков; разработан расчетный аппарат для проектирования балок с этими стыками; даны рекомендации: по конструкции стыков, по устройству оборудования для сварки нижнего пояса в стыке; по технологии навесной сборки мостовых балок с применением комбинированных стыков, по технологии сварки многолистовых поясов

в стыке, позволяющей устранить выявленный концентратор напряжений. Кроме того, разработанные расчетные методики могут быть использованы для оценки: несущей способности болтосварных нахлесточных соединений; остаточных сварочных напряжений, возникающих при многослойной сварке встык поясов балок; работы балок при нелинейных и пластических деформациях и наличии начальных (остаточных) напряжений; концентрации напряжений в элементах с прямоугольным отверстием.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований включены в "Руководство по выполнению монтажных сварных соединений металлических пролетных строений мостов" и использованы в проектах построенных в X пятилетке городских мостов через реки Обь в г.Новосибирске и Ангару в г.Иркутске. Фактический экономический эффект от применения болтосварных стыков взамен болтовых в главных балках этих пролетных строений составил более I млн.руб., при этом расход стали уменьшен на 1290 т, а трудозатраты - на 25145 чел.-дней. К настоящему времени запроектировано еще шесть мостов с монтажными болтосварными стыками.

Публикация результатов и апробация работы. Результаты работы отражены в 6 статьях, 3 авторских свидетельствах на изобретение, 4 научно-исследовательских отчетах ЦНИИС.

Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Машин и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им.Н.Э.Баумана, на заседаниях секции "Искусственные сооружения" Ученого совета ЦНИИС, секции "Металлические мосты" Научно-технического совета НИИ мостов, на научно-техническом семинаре отдела инженерных сооружений ЦНИИПроектстальконструкция. Отдельные разделы работы докладывались на VIII и X научно-технических конференциях молодых специалистов и аспирантов ЦНИИС, на V Всесоюзной конференции "Экспериментальные исследования инженерных сооружений", на Научно-техническом совете Минтрансстроя СССР, экспонировались на ВДНХ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и четырех приложений. Основное содержание изложено на 124 страницах машинописного текста, включает 62 рисунка и 8 таблиц. Библиография содержит 154 наименования, из них 46 иностранных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализированы отечественный и зарубежный опыт применения и результаты известных исследований болтосварных соединений в элементах мостов, обоснованы и сформулированы задачи работы.

До настоящего времени, несмотря на положительный опыт использования в СССР и за рубежом комбинированных болтосварных соединений, существуют определенные противоречия, касающиеся возможности их широкого применения в проектируемых мостах.

Анализ показывает, что сварное и болтовое фрикционное соединения при нагружении имеют различный характер деформирования. Этим обуславливается статическая неопределимость задачи по расчету несущей способности комбинированного болтосварного соединения.

Основными недостатками конструкции зарубежных монтажных болтосварных стыков являются узкий зазор между кромками стенок состыкованных блоков балок, играющий роль острого надреза в зоне сварных швов поясов, и невозможность выполнения непрерывной автоматической сварки по всей ширине нижнего пояса. Кроме того, при навесном монтаже используются вспомогательные устройства и приспособления, неоправданно удорожающие строительство.

Сварка поясов, в отличие от сборки соединения стенки на высокопрочных болтах, вызывает появление остаточных сварочных напряжений. Исследованиями Г.А.Николаева, В.А. Винокурова, А.В.Вершинского, Н.О.Скерблома, Р.З.Маниловой, Л.П.Шелестенко, А.Д.Богсмолова, Д.А.Несеркота и др. выявлено значительное влияние остаточных напряжений на работоспособность балочных элементов, что указывает на необходимость оценки несущей способности болтосварных стыков с учетом собственных остаточных сварочных напряжений.

Большие толщины поясов мостовых балок предопределяют выполнение многослойных стыковых швов. В работах Г.А.Николаева, В.А.Винокурова, С.А.Куркина, А.Г.Григорьянца, В.И.Махненко, В.М.Сагалевица, К.Сатоши, К.Тераи и др. в основном исследованы остаточные напряжения в многослойных швах свободнолежащих листов. Для сечений балок при сварке встык их поясов этот вопрос изучен недостаточно.

Одним из основных показателей надежной работы болтосвар-

ного стыка является его выносливость. Исследования В.Ю.Шишкина, В.И.Олекова, П.Гоерга показывают, что она может быть прогнозируема с учетом выносливости сварного и болтового соединений, в изучение которых большой вклад внесли В.И.Труфяков, Д.И.Навроцкий, П.И.Кудрявцев, К.П.Большаков, В.Д.Мюнзе, Т.М.Богданов, В.О.Осипов, В.М.Вейнблат и др. Данные Ш.Кихара, К.Масубучи, Ф.Тшмернега, К.Рейтера свидетельствуют о преждевременном усталостном разрушении в монтажных стыках балок сварных стыковых соединений многолистовых поясов, выполненных по технологическим рекомендациям ФРГ, США и Японии. Отечественные рекомендации по данному вопросу до настоящего времени не разрабатывались.

В связи с изложенным, в диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

1. Изучить закономерности в поведении болтосварных соединений, разработать методики их расчета и усовершенствовать конструкцию монтажного болтосварного стыка мостовых балок.

2. Исследовать собственные остаточные сварочные напряжения в монтажном болтосварном стыке и оценить их влияние на его деформативность и устойчивость стенки балки в отсеке со стыком.

3. Разработать технологию навесной сборки балок с помощью монтажного болтосварного стыка, обеспечивающую минимальное отрицательное влияние его собственных остаточных напряжений.

4. Выявить причины преждевременного усталостного разрушения сварных стыковых соединений многолистовых поясов в монтажных стыках балок и разработать методы повышения их выносливости.

Во второй главе изложены основные расчетно-конструктивные принципы проектирования болтосварных стыков, разработанные на основе выявленных закономерностей их поведения и совершенствования конструкции.

Исследование закономерностей в работе комбинированных болтосварных стыков выполнялось путем моделирования схем деформирования при нагружении. Для определения возможности их расчета по методикам, известным для болтосварных нахлесточных соединений, рассматривались оба случая.

Установлено, что основной особенностью работы болтосварного нахлесточного соединения является перегрузка сварных швов, вызванная тем, что они препятствуют взаимному смещению деталей болтосварного соединения. На основе этого получено

соотношение:

$$N_K = 0,5(N_c + 3N_b),$$

где N_c, N_b, N_K - соответственно усилия, обуславливающие одинаковую величину взаимного сдвига деталей сварного, болтового и болтосварного соединений. Это соотношение удовлетворительно согласуется с обобщенной формулой Г.А.Николаева и экспериментальными данными Г.В.Лавочкина.

В болтосварном стыке балок, в отличие от нахлесточного соединения, сварное и болтовое соединения принадлежат различным элементам сечения. Поэтому сварные стыковые швы пояса не изменяют обычной схемы деформирования болтового соединения стенки, вследствие чего поведение комбинированного стыка идентично поведению элементов с комбинированным сечением. Это позволяет для расчета стыка использовать принципы расчета элементов с такими сечениями.

Известные методики расчета комбинированных сечений балок используют идеализированные диаграммы упруго-пластического деформирования материалов. В связи с этим разработана методика численного расчета балок с комбинированными стыками и сечениями, согласно которой нелинейность деформирования их составных элементов учитывается с помощью методов теории пластичности, представленных в трудах С.П.Тимошенко, Н.Н.Малинина, А.А.Потапкина и др. для расчета балок с однородными сечениями. Основным этапом методики является последовательное определение изгибающих моментов

$$M_j = \frac{1}{x_j} \int_{\epsilon_{aj}}^{\epsilon_{bj}} b_i \cdot \sigma(\epsilon)_i \cdot \epsilon \cdot d\epsilon$$

при итерационном подборе равновесия горизонтальных сил в сечении

$$\frac{1}{x_j} \int_{\epsilon_{aj}}^{\epsilon_{bj}} b_i \cdot \sigma(\epsilon)_i \cdot d\epsilon = 0,$$

здесь $x_j = (\epsilon_{bj} - \epsilon_{aj})/\eta$ - кривизна сечения, b_i - ширина элемента сечения, $\sigma(\epsilon)_i$ - функция диаграммы деформирования материала, ϵ_{aj} и ϵ_{bj} - соответственно деформация нижней и верхней по высоте точек сечения. Полученная диаграмма изгиба $M(x)$ используется для определения напряжений в сечениях и прогибов балки. Про-

верка методики при расчете балок с идеализированными диаграммами деформирования показала совпадение с результатами Н.О.Окерблома, А.А.Казимирова и др.

Испытание крупномасштабной балки с болтосварным стыком также подтвердило правильность расчетных предположений. Измеренные прогибы балки и напряжения в стыке практически соответствовали расчетным на всем диапазоне нагружения и показали, что несущая способность болтосварного стыка незначительно (в пределах 5 %) уступает несущей способности сечения.

При совершенствовании конструкции монтажного комбинированного болтосварного стыка выявленные недостатки были устранены введением технологических окон (рис. I), позволивших одновременно повысить выносливость стыка и технологичность его сборки за счет плавности сопряжения стенки с обоими поясами и возможности выполнения по всей их ширине непрерывной автоматической сварки в нижнем положении. При этом накладки болтового соединения состоят из основных, перекрывающих стенку до технологических окон, и дополнительных, закрывающих окна. Сварку нижнего пояса выполняют через окно либо серийным сварочным трактором с пристроенным к нему удлинителем, на который вынесен сварочный мундштук, либо разработанным устройством (а.с. № 729011) со штангой, движущейся в корпусе, закрепленном на свариваемом поясе.

Экспериментальное опробование усовершенствованной конструкции стыка при сборке и испытании крупномасштабной балки показало целесообразность ее использования при навесном монтаже пролетных строений. Установлено, что важное преимущество данной конструкции заключается в надежной фиксации свариваемых кромок поясов с помощью болтового соединения стенки, собранного на основных накладках, которое также способно воспринимать вес присоединяемого блока.

В третьей главе проанализировано влияние остаточных сварочных напряжений в монтажном болтосварном стыке на устойчивость стенки мостовой балки при навесном монтаже и на деформативность стыка при эксплуатации пролетного строения, предложена технология сборки стыка, обеспечивающая минимальное отрицательное влияние этих напряжений.

В основу методики расчета остаточных напряжений в болтосварном стыке положена схема, разработанная В.А.Винокуровым

для многослойных стыковых швов свободнолежащих листов. Дополнительно в расчет введены: переменная по высоте шва величина поперечной усадки, принятая в соответствии с данными В.В.Шипа, разные модули упругости поясов и стенки, параметры сечения балки. Для учета влияния технологических окон на распределение напряжений в стенке применены решения А.В.Верховского, В.П.Андропова и др., полученные с использованием гипотезы неплоских сечений. При экспериментальном изучении остаточные напряжения оценивались по результатам измерения остаточных деформаций после сварки и последующего соотрагивания (метод Калакуцкого-Закса) поясов моделей, представляющих собой отсек крупномасштабной балки.

Установлено, что в корне стыковых швов поясов остаточные напряжения сжимающие, а в остальной части их сечения — растягивающие, что качественно согласуется с данными В.А.Винокурова о напряжениях в многослойных стыковых швах листов, свариваемых в конструкции. По высоте стенки сжимающие напряжения распределяются по гиперболической закономерности с экстремальными значениями в зоне технологических окон. Расхождение расчетных и экспериментальных данных составляло менее 15 %, что позволило применить разработанную методику для практических целей.

Влияние остаточных сварочных напряжений на устойчивость стенки балки в отсеке с болтосварным стыком анализировалось с помощью метода расчета пластинчатых систем, разработанного А.В.Александровым и Е.Н.Трошко. Рассмотрены условия навесного монтажа, при которых вес присоединяемого блока воспринимает болтовое соединение, собранное на основных накладках. Расчетной моделью стенки являлась прямоугольная пластина с жестким защемлением по трем сторонам (в местах примыкания к поясам и вертикальному ребру жесткости), свободными кромками (в зоне окон) и опиранием на упругий контур (по высоте накладок) по четвертой стороне.

Установлено, что в реальных условиях строительства за счет исследованных остаточных напряжений снижение величины критической монтажной нагрузки может достигать 30 %. Выявленная форма деформированной при потере устойчивости поверхности стенки показала, что выпучивание охватывает практически всю ее ширину между вертикальными ребрами и накладками болтового сое-

динения. При этом вблизи нижнего окна (в сжатой зоне) имеет место резкий перелом. При экспериментальном моделировании навесной сборки крупномасштабной балки потеря устойчивости произошла в процессе сварки нижнего пояса при нагрузке, соответствующей фактической монтажной нагрузке строящихся пролетных строений. Форма выпучивания стенки соответствовала расчетной.

Известные методы расчета прогибов балок с остаточными напряжениями строятся на том, что на определенном этапе нагружения из площади сечения балки исключается площадь зоны, в которой при взаимодействии остаточных и эксплуатационных напряжений происходят пластические деформации. Однако, по данным Р.З.Маниловой, удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов наблюдается до нагрузки примерно в 1,5 раза меньшей предела текучести материала.

В связи с этим обоснован новый подход к расчету элементов с остаточными напряжениями, базирующийся на аналогии их деформирования с деформированием элементов с комбинированными сечениями и заключающийся в использовании принципов расчета этих элементов. Разработанный метод состоит в преобразовании диаграммы деформирования материала $\sigma(\epsilon)_i$ путем переноса начала ее координат на величину остаточных напряжений $\sigma_{0,i}$ и соответствующих им деформаций $\epsilon_{0,i,j} = \epsilon[\sigma(\epsilon)_i, \sigma_{0,i}]$ в зонах сечения рассчитываемого элемента. После совмещения новых точек начала координат элемент рассматривается как имеющий условно-комбинированное сечение с разными диаграммами деформирования указанных зон. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, полученными Р.З.Маниловой и Л.П.Шелестенко при испытании сварных и прокатных балок, имело удовлетворительное согласование на всем диапазоне нагружения.

Это позволило применить метод условно-комбинированных сечений для анализа поведения болтосварного стыка с собственными остаточными сварочными напряжениями. Их влияние отчетливо прослеживается на диаграмме изгиба, из которой следует, что стык вступает в упруго-пластическую стадию работы при нагрузке примерно в 1,5 раза ниже расчетной (рис.2).

За основное требование к технологическим приемам, позволяющим снизить отрицательное влияние остаточных напряжений болтосварного стыка на его работоспособность, принята возмож-

ность их выполнения до сварки поясов. Установлено, что этому условию в наибольшей степени отвечает усиление стенки отсека со стыком на время сварки поясов продольными ребрами, закрепляемыми вблизи технологических окон. Ребра, воспринимая на себя часть напряжений, одновременно ограничивают перемещение стенки из плоскости. Выявлено также, что при увеличении их жесткости остаточные сжимающие напряжения резко уменьшаются, а растягивающие — нарастают незначительно. На основе этого применительно к навесной сборке мостовых балок разработана технология (а.с. № 588280), заключающаяся в том, что вес присоединяемого блока передают на болтовое соединение стенки, усиленной временными ребрами, которые после сварки поясов снимают вместе с ослаблением натяжения части болтов, за счет чего снижаются и остаточные растягивающие напряжения в поясах.

Экспериментальная проверка выполнялась при моделировании условий навесной сборки и статическом испытании крупномасштабной балки с четырьмя болтосварными стыками. Ни в одном из стыков при создании монтажной нагрузки, соответствующей реальной, выпучивание стенки не наблюдалось. Измеренные прогибы и напряжения показали, что стыки работают упруго до нагрузки, превышающей расчетное сопротивление материала (см. рис.2).

В четвертой главе приведены результаты исследований, доказывающие наличие концентрации напряжений в месте пересечения шва и зазора между листами в сварном стыковом соединении многолистных поясов балок, и предложена технология сварки, предотвращающая образование выявленного концентратора.

Выносливость болтосварных стыков балок с многолистными поясами исследовалась на двух крупномасштабных балках, испытываемых под многократно-повторными нагрузками на режимах, характерных для реальных пролетных строений мостов. В первой балке сварку встык двухлистных поясов выполняли по технологии, принятой для однолистных элементов, во второй — по нормам ФРГ. Установлено, что как в одном, так и в другом случае, соединения разрушаются ранее положенного для мостовых конструкций числа циклов — 2 млн. Анализ факторов, существенно влияющих на выносливость, показал, что одной из основных причин преждевременного разрушения этих соединений является концентрация напряжений в месте пересечения шва и зазора между листами (рис.3). Очертание концентратора в основном приближается к

прямоугольному, в ряде случаев встречаются шлаковые включения круглого или эллиптического сечения.

Изучение схем напряженного состояния соединений позволило установить, что их математической моделью может служить растягиваемая плоскость с отверстием соответствующего сечения. В связи с тем, что для круглого или эллиптического отверстия коэффициенты концентрации известны, для сопоставления с ними специально исследовалась только плоскость с длинным прямоугольным отверстием. С помощью метода Н.И.Мусхелишвили для этой задачи получено выражение теоретического коэффициента концентрации в виде

$$\beta_T = 4 \cdot \frac{\Phi_1 u_1 + \Phi_2 u_2}{u_1^2 + u_2^2},$$

где Φ_1, Φ_2, u_1, u_2 - функции полярной координаты точки контура отверстия в плоскости комплексного переменного. Из выявленной зависимости β_T от соотношения радиуса R скругления углов отверстия к его ширине h следует, что концентрация напряжений отсутствует (в пределах 10 %) только при $R/h \geq 4$, с уменьшением этой величины она резко возрастает.

Исследования методом фотоупругости качественно подтвердили эти результаты и показали, что, вследствие локальности концентрации напряжений, их можно распространить на пакеты с произвольным количеством листов одинаковых и разных толщин. Сопоставлением вычисленных значений теоретического коэффициента концентрации напряжений со значениями коэффициентов для дефектов круглого или эллиптического сечения установлено, что все они являются величинами одного порядка, в связи с чем в реальном соединении всегда присутствует высокая концентрация напряжений с $\beta_T \geq 2$.

Для сравнения выносливости соединений пакетов, сваренных по известным в мировой практике технологическим рекомендациям, проведены испытания образцов на усталость. Выявлено, что ни один из них не обеспечивают соединениям существенных преимуществ перед другими. Разрушение во всех случаях начиналось от места пересечения шва и зазора между листами. Минимальное из полученных значений эффективного коэффициента концентрации напряжений R_σ составляло 1,68, тогда как ранее считалось, что оно равно 1. Эти данные следует расценивать как нижнюю границу R_σ для реальных мостовых балок, так как их натурное обследо-

дование показало, что в большинстве случаев зазор между листами поясов во много раз больше зазора в пакете испытанных образцов.

В связи с этим разработана технология сварки многолистовых поясов балок в монтажных, в частности, болтосварных стыках (а.с. № 7290II), позволяющая устранить выявленный концентратор напряжений путем предотвращения сплавления листов пакета стыковым швом. Для этого в соединении предусматривают вставки во всех листах, кроме свариваемого первым (см.рис.3). Перед установкой вставки листы отжимают от ранее сваренных на величину зазора, устраняемого в процессе поперечной усадки полнотой заваренных многослойных стыковых швов, которые выполняют на легкоудаляемых подкладках, формирующих обратный валик с усилением, не превышающим 0,5 мм. После первых слоев шва подкладки убирают и продолжают сварку до полного заполнения разделки. Сварка в условиях строительства показала, что предложенная технология также упрощает контроль качества стыковых швов соединения.

В приложениях приведены материалы по внедрению, расчету экономического эффекта, изобретениям и программам для ЭВМ.

ВЫВОДЫ

1. Анализ факторов, влияющих на несущую способность комбинированных болтосварных стыков балок, позволил установить, что основными из них являются различная деформативность сварного соединения пояса и болтового соединения стенки, собственные остаточные сварочные напряжения и выносливость сварного стыкового соединения многолистовых поясов. Эти факторы следует учитывать при проектировании, монтаже и эксплуатации пролетных строений мостов.

2. На основе изучения схем деформирования выявлена аналогия в поведении болтосварных стыков балок, элементов с комбинированным сечением и элементов с остаточными напряжениями, выражающаяся в том, что воспринимаемое ими усилие зависит от характера деформирования сварного и болтового соединений, зон с разным уровнем напряжений и разных материалов, соответственно входящих в стык и указанные элементы, в связи с чем они могут быть отнесены к одной группе статически неопределимых сис-

тем и рассчитываться методами, применяемыми для элементов с комбинированным сечением.

3. Для учета нелинейности деформирования составных элементов болтосварного стыка разработана методика расчета балок с комбинированными стыками и сечениями, которая базируется на методах решения задач упруго-пластического изгиба балок с однородными сечениями и заключается в определении изгибающих моментов при итерационном подборе равновесия горизонтальных сил в сечении, построении диаграмм изгиба и определении с их помощью прогибов и напряжений.

4. Исследование, выполненное расчетными и экспериментальными методами, показало, что при отсутствии собственных остаточных сварочных напряжений в болтосварном стыке его несущая способность практически не уступает несущей способности сечения балки. Указанные остаточные напряжения, взаимодействуя с напряжениями от внешних нагрузок, при навесном монтаже могут привести к потере устойчивости стенки в отсеке со стыком, а при эксплуатации увеличить его деформативность более, чем на 20 %.

5. Аналитическое и экспериментальное изучение остаточных сварочных напряжений в болтосварном стыке позволило установить, что в стенке с технологическими окнами, обеспечивающими снижение концентрации напряжений и возможность непрерывной автоматической сварки обоих поясов, сжимающие напряжения распределяются по гиперболической закономерности в соответствии с гипотезой неплоских сечений. Для рассмотренного стыка балки подтверждены данные В.А.Винокурова о возможности образования сжимающих напряжений в корне многослойного стыкового шва при сварке листовых элементов в конструкции.

6. Устойчивость стенки балки в отсеке с болтосварным стыком при наличии остаточных сварочных напряжений может быть оценена с помощью известного метода расчета пластинчатых систем. Для учета влияния этих напряжений на деформативность стыка разработан метод расчета элементов с остаточными напряжениями, заключающийся в преобразовании диаграмм деформирования путем переноса начала координат на величину остаточных напряжений и деформаций, что позволяет в дальнейшем рассматривать сечения элементов как условно-комбинированные и применить к ним различные методы теории пластичности, в том числе ука-

занную ранее разработанную методику расчета балок с комбинированными стыками и сечениями.

7. Анализ возможных технологических приемов по предотвращению отрицательного влияния остаточных сварочных напряжений на работоспособность стыка показал, что наиболее эффективным из них является применение временных продольных ребер жесткости, с помощью которых в процессе монтажа регулируют величину и распределение напряжений. Разработанная на основе этого технология навесной сборки мостовых балок позволяет снизить отрицательное влияние остаточных напряжений примерно на 80 %.

8. В результате решения математической задачи теории упругости, исследований методом фотоупругости и испытаний на усталость выявлено, что сварные стыковые соединения многолистовых поясов балок, выполняемые по существующим в мировой практике технологическим рекомендациям, склонны к преждевременному разрушению, вызванному наличием ранее неизвестного концентратора напряжений в виде места пересечения стыкового шва и зазора между листами пакета. Полученные значения теоретического и эффективного коэффициентов концентрации сопоставимы со значениями коэффициентов для дефектов сварки, имеющих круглое или эллиптическое сечение.

9. Анализ результатов натурного обследования позволил установить, что учет выявленного концентратора напряжений с помощью нормативного коэффициента концентрации может привести к существенному повышению металлоемкости мостовых балок. В связи с этим разработана технология сварки, предотвращающая образование этого концентратора путем использования в соединении вставок и задания свариваемым листам предварительных угловых деформаций, устраняемых при поперечной усадке металла швов.

10. Проведенный комплекс аналитических и экспериментальных исследований позволил обосновать технико-экономическую целесообразность широкого применения комбинированных болтосварных стыков при навесном монтаже пролетных строений мостов. Результаты исследований включены в "Руководство по выполнению монтажных сварных соединений металлических пролетных строений мостов" и внедрены в проекты построенных в X пятилетке городских мостов через реки Обь в Новосибирске и Ангару в Иркутске. Фактический экономический эффект от применения монтажных бол-

тосварных стыков взамен болтовых в главных балках этих пролетных строений составляет более 1 млн.руб. К настоящему времени запроектировано еще шесть мостов с монтажными болтосварными стыками.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Шаферман И.М. Исследование собственных напряжений в монтажных болтосварных стыках двутавровых балок. - Тр./ЦИИС, 1976, вып.99, с. 41-56.
2. Большаков К.П., Шаферман И.М. Исследование работы монтажного болтосварного стыка двутавровой балки. - М.Предст.ЦИИС. Деп.рукоп. Оргтрансстрой, 1978, № 28. - 33 с.
3. Шаферман И.М., Бейвель А.С. Исследования концентрации напряжений в сварном стыковом соединении двухлистовых поясов мостовых балок. - М. Предст.ЦИИС. Деп.рукоп., ЦИИС, 1980, № 2130. - 13 с.
4. Большаков К.П., Шаферман И.М. Оценка концентрации напряжений в сварных стыковых соединениях многолистовых поясов балок. - Экспериментальные исследования инженерных сооружений: Тезисы докладов У Всесоюзной конференции. Киев, НИИСК, 1981, с.93.
5. Концентрация напряжений в сварном стыковом соединении многолистовых пакетов. / А.Г.Григорьянц, А.З. Авербух, К.П.Большаков, И.М.Шаферман. - Изв.ВУЗов. Машиностроение, 1981, № 7, с. 25-29.
6. А.с. № 568280 (СССР). Способ сборки монтажного комбинированного стыка блоков сплошностенчатой балки. /К.П.Большаков, И.М.Шаферман. - Заявл. № 25.07.1975 г., № 2164314/29-33. Опубл. в Б.И., 1978, № 2, с. 87.
7. А.с. № 605708 (СССР). Устройство для автоматической электродуговой сварки прямолинейных швов ограниченной длины. /К.П.Большаков, И.М.Шаферман. - Заявл. 29.12.1975 г., № 2306379/25-27. Спубл. в Б.И., 1978, № 17, с. 39.
8. А.с. № 729011 (СССР). Способ сварки встык многослойных элементов. /К.П.Большаков, Ю.Д.Бычков, Н.Н.Рудомазин, И.М.Шаферман. - Заявл. 24.06.1977 г. № 2500339/25-27. Опубл. в Б.И., 1980, № 15, с. 58.
9. Bolshakov K.P., Shaferman I.M. Fatigue Strength of Welded Butt Joints of Multiple Plate Flanges of Beams. - IABSE Reports, 1982, volum 37, p. 332-336.

И.М.

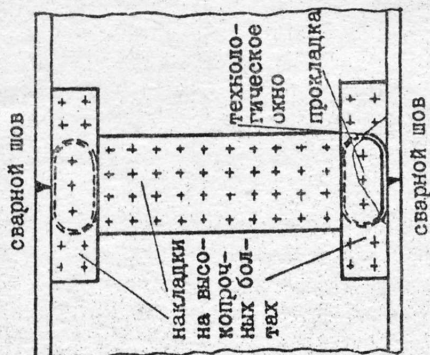


Рис.1. Усовершенствованная конструкция монтажного болтосварного стыка мостовой балки

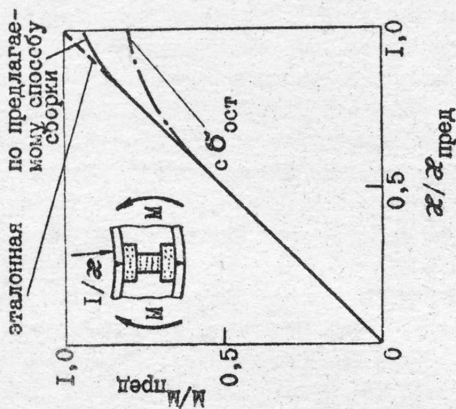


Рис.2. Диаграмма изгиба болтосварного стыка

технология
однолистовых
элементов

технология
по нормам
ФРГ



предложенная технология

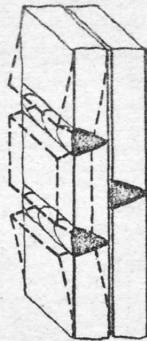


Рис.3. Сварные соединения двухлистовых поясов балок в монтажных стыках