

М194667
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ПРОХОРОВ Владимир Никифорович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ УЗЛОВ БАЛОК
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

(05.04.05 — Технология и машины сварочного
производства)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



1194667

Прохоров В.Н. Исследования

Работа выполнена в ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор Сагалеви́ч В. М.

Научный консультант —
кандидат технических наук, доцент Вершинский А. В.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Кудрявцев И. В.,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Золотарев Б. Б.

Ведущее предприятие — ВНИИПТМАШ, г. Москва.

Авторефе

1973 г.

Защита

1973 г.

на заседа
Московско
Знамени в
на по адре

Красного
Э. Баума-

Ваши
просьба в

печатью,

С дисс
лица.

теке Учи-

Ученый

1194667

ВВЕДЕНИЕ

К сварным металлическим конструкциям предъявляются высокие требования в отношении проектирования и изготовления с целью обеспечения надежной долговременной эксплуатации.

Сварная металлоконструкция является основой многих механизмов и систем, в процессе эксплуатации которых в отдельных элементах конструкции возможно развитие трещин под действием внешних нагрузок. Проблема повышения работоспособности сварных соединений и конструкций при действии как статических так и переменных нагрузок, несмотря на значительные достижения в этой области, актуальна и в настоящее время.

Несущие узлы мостовых подъемных кранов, балки рам вагонов, сварные рамы прессов — это далеко не полный перечень видов конструкций, для которых обеспечение повышения долговечности отдельных сварных узлов является существенным для долговременной эксплуатации конструкции в целом.

Для сварных узлов конструкций балочного и рамного типа характерно применение общих конструктивно-технологических решений, которые предопределяют сложное взаимодействие факторов, влияющих на долговечность элементов. Усталостные повреждения, выявляющиеся в виде отдельных трещин значительной протяженности, начинают развиваться в процессе эксплуатации в местах изменения сечений и зонах расположения криволинейных швов. Сварные конструкции имеют значительные остаточные напряжения. Для разрушения, как правило, характерна высокая конструктивно-технологическая концентрация напряжений в элементах конструкции. В условиях интенсивной эксплуатации машин трещины в сварных соединениях обнаруживаются при малом числе циклов нагружения. Характерным примером в этом отношении являются сварные металлоконструкции мостовых подъемных кранов, конструктивная прочность которых определяется долговечностью сварных несущих узлов. Количество циклов, соответствующее появлению трещины, высокий уровень напряжений в ответственных элементах и малая частота повторения нагружений приводят к развитию процессов малоциклового усталости.

Сварные балочные металлоконструкции отличаются от аналогичных ферменных меньшей трудоемкостью изготовления и более высокой усталостной прочностью. Однако, известные случаи усталостного повреждения конструкций различных машин требуют проведения глубокого анализа явлений, способствующих возникновению и распространению усталостных разрушений и дальнейшего развития эксперименталь-

ИВТ
И. И. С. С. С. С.
БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

но-теоретических методов исследований, направленных на совершенствование конструктивно-технологических решений.

В настоящей работе рассматриваются вопросы циклической прочности сварных балочных конструкций на примере несущих узлов мостовых кранов с учетом их основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

Глава I. ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ БАЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МОСТОВЫХ КРАНОВ

На основании анализа известных исследований, направленных на повышение конструктивной прочности металлоконструкций мостовых кранов установлено следующее.

Срок эксплуатации металлоконструкции крана до появления трещины в сварных элементах от действия циклических нагрузок значительно меньше требуемого периода безаварийной работы конструкции. Развитие трещин в подавляющем большинстве случаев происходит из зоны криволинейных угловых швов, расположенных в местах изменения формы балок коробчатого сечения. Наименьшая долговечность свойственна надбуксовым узлам концевых балок. Указанные опорные узлы имеют ступенчатое изменение высоты сечения с радиальным скруглением контура перехода. Опорные полки концевых балок соединены с вертикальными стенками угловым сварным швом.

Известны исследования напряженного состояния опорных узлов концевых и главных балок с целью определения и снижения коэффициента концентрации напряжений (Концевой Е.М., Крайчи Э.Ф.). В работах данного направления имеются приближенные зависимости для определения напряжений от внешних нагрузок и рекомендации по повышению прочности узлов за счет применения дополнительных конструктивных элементов и увеличения толщины листового материала.

С учетом влияния сварки на долговечность конструкций предложен ряд технологических приемов, повышающих работоспособность сварных элементов при циклических нагрузках (Аснис А.Е., Кудрявцев И.В., Труфяков В.И., Мюнзе, Пухнер). Наряду с этим исследования динамики металлоконструкций в процессе эксплуатации (Петухов П.З., Казак С.А., Валь В.Н.) показывают, что периодически возникают возмущения напряжений от внешней нагрузки, превышающие уровень расчетных значений и приводящие к снижению долговечности.

На предел выносливости сварных конструкций оказывают влияние следующие факторы: характеристики изменения внешних циклических нагрузок, концентрация напряжений, зависящая от формы элемента и

качества сварных соединений, остаточные сварочные напряжения механические свойства материала и условия эксплуатации конструкции (температура, среда и т.д.). Для рассматриваемых сварных конструкций характерным является сложное взаимодействие указанных факторов. Анализ переменного нагружения и работоспособности сварных элементов при циклическом нагружении производится в данной работе по первым трем основным факторам, которые определяются конструктивно-технологическими и эксплуатационными особенностями несущих узлов кранов. При этом принимается, что механические свойства материалов и условия эксплуатации кранов общего назначения являются одинаковыми.

Концентрация напряжений в опорных узлах балок мостовых кранов определяется как конструктивным изменением формы элементов, так и наличием остаточных сварочных напряжений. Остаточные напряжения характерны для сварных соединений и так же, как неоднородность структуры и механических свойств материала по сечению сварных элементов, являются технологическим концентратором. Взаимодействие эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов вызывает циклическую перегрузку сварных элементов (динамические возмущения на стыках рельсов, наличие резких переходов сечения, возможно, дефектов и растягивающих остаточных напряжений). В сочетании с повторно-статическим характером основного нагружения указанные факторы определяют малоцикловый характер нагрузок, воспринимаемых опорными узлами моста крана.

Методика расчета усталостной прочности металлоконструкций крановых мостов совершенствуется на основе исследований характеристик эксплуатационных нагрузок и экспериментально-теоретического уточнения расчетных параметров (Гохберг М.М.). Однако, малоцикловый характер нагрузок накладывает особые условия на работу сварных соединений в зоне концентрации напряжений от внешней нагрузки, что не учитывается в существующей методике оценки несущей способности конструкции.

На основании проведенного анализа сформулированы основные направления настоящих исследований. Целью работы является разработка мероприятий по повышению долговечности сварных узлов балок на основе исследований влияния конструктивно-технологических факторов, на работоспособность данных элементов металлоконструкции.

Цель исследований предопределяет основные задачи:

1. Разработка методики исследования и экспериментальной установки для испытаний в диапазоне частот повторения нагрузки, со-

ответствующих повторно-статическому режиму.

2. Исследование работоспособности основного материала элементов конструкции, сварных соединений и опорных узлов балок при циклических нагрузках в условиях совместного и раздельного влияния различных конструктивных и технологических факторов.

3. Разработка и обоснование практических рекомендаций применительно к конструктивному решению сварных опорных узлов с резким изменением высоты сечения и к методике оценки их несущей способности.

Глава II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОПОРНЫХ УЗЛОВ БАЛОК

Теоретические аспекты оценки несущей способности элементов конструкций в связи с сопротивлением малоцикловому разрушению разрабатываются на базе экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния. Настоящая работа также основана на анализе экспериментальных исследований.

В исследованиях Марина Н.И., Ужика Г.В., Кларка, Вуда отмечается, что процессы упруго-пластического деформирования материала развиваются наиболее полно при малых частотах повторения нагружений. Предварительные испытания сварных балок показали, что при снижении частоты нагружений с 300 до 15 циклов в минуту при прочих равных условиях долговечность уменьшилась примерно в два раза.

В зоне вертикальной стенки опорных узлов, ответственной с точки зрения циклической прочности конструкции, напряжения от внешней нагрузки изменяются по пульсирующему циклу (Крейчи Э.Ф.). В связи с этим основным видом нагружений, рассматриваемым в исследованиях являлись малоцикловые нагрузки с частотой повторения 10-30 циклов в минуту и коэффициентом асимметрии цикла 0,1. В ряде случаев производилась проверка и по динамическим нагрузкам с частотой повторения 300 циклов в минуту на базе 10^6 циклов.

Для проведения экспериментальных работ был изготовлен универсальный испытательный стенд на основе серийной установки МУП-50. Стенд позволяет производить нагружения в статическом (50 тс), динамическом (25 тс, 330-1000 циклов в минуту) и повторно-статическом режимах нагружения (50 тс, 10-30 циклов в минуту). Беспульсаторное регулирование повторно-статических нагружений достигнуто применением электроконтактного манометра и электрогидравлического клапана.

Оценку несущей способности рассматриваемых крупногабаритных элементов со ступенчатым изменением высоты сечения целесообразно проводить на моделях, сохраняющих основные конструктивно-техноло-

гические особенности натуральных узлов. Коэффициент масштабного уменьшения высоты и длины опорного узла концевой балки в принятой модели равен 2. Толщина стенки и полук двутавровой модели со ступенчатым изменением высоты сечения выбрана из условия максимального приближения характеристик и режимов сварных соединений к натурным узлам. Конструкция сопрягаемых узлов допускает изменение радиуса кривизны контура в определенных пределах. В связи с этим исследованы модели с двумя предельными значениями радиуса скругления 45 мм и 100 мм, при постоянном значении прочих геометрических характеристик. Известно, что одним из основных факторов, влияющих на долговечность сварных соединений и элементов являются остаточные напряжения. Для обоснования причин появления трещин при циклическом нагружении надо знать, какие напряжения от внешней нагрузки и остаточные сварочные напряжения соответствуют рассматриваемому периоду циклических нагружений. Напряжения от внешней нагрузки в вертикальной стенке опорного узла определялись тензометрированием указанных моделей. Для определения остаточных сварочных напряжений применялся механический метод с использованием тензометров, разработанных в МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Основной целью планируемых исследований является анализ механизма малоциклового разрушения с учетом влияния остаточных напряжений. Эта задача включает два этапа исследований. Во-первых, изучение кинетики пластического деформирования материала в различных условиях технологической концентрации напряжений. Во-вторых, определение характеристик малоциклового разрушения соответствующих групп исследуемых элементов. Исследования проводились на простых образцах, воспроизводящих работу материала в опасном сечении конструкции и удобных для детального анализа процессов, определяющих разрушение. В ходе исследований определено влияние малоциклового растяжения на изменение первоначального уровня остаточных напряжений. Особенности пластического деформирования сварных элементов, отличающихся распределением остаточных напряжений по сечению, определены осциллографированием процесса нагружения с помощью датчиков перемещения с базой 10 мм. Датчик перемещения представляет собой упругий элемент с наклеенными тензодатчиками сопротивления. Упругий элемент располагался между упорами, привариваемыми на конденсаторной контактной машине к поверхности образца. При значительной величине пластической деформации растяжения в зоне геометрического концентратора напряжений сравнительная оценка различных групп образцов производилась по изменению толщины плоского образца.

Работоспособность исследуемых групп сварных элементов с различным распределением остаточных напряжений оценивалась по характеристикам малоциклового выносливости.

Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ОПОРНЫХ УЗЛОВ БАЛОК

Ответственным сварным элементам опорных узлов присуща концентрация напряжений от внешней нагрузки и концентрация остаточных сварочных напряжений. Учитывая сложную геометрию конструкции опорного узла, поле напряжений от внешних нагрузок и остаточные сварочные напряжения определялись экспериментально.

При определении напряженного состояния стенки опорного узла от внешней нагрузки тензометрируемые точки располагались вдоль контура перехода на различном расстоянии от оси сварного соединения. Величина и характер распределения напряжений определялись в зависимости от условий работы узла, величины внешней нагрузки и кривизны контура перехода в зоне изменения высоты сечения.

В проведенных исследованиях отмечено, что при циклическом нагружении сварных опорных узлов концевых балок происходит изменение условий работы отдельных элементов при постоянстве характеристик циклического нагружения. Для рассматриваемой зоны вертикальной стенки балки значение максимального напряжения цикла существенно зависит от жесткости крепления узла к ходовой части крана. Обработка экспериментальных данных по тензометрированию опорного узла с радиусом перехода 45 мм показала следующее. При действии вертикальной нагрузки 15 тс на балку с жестким креплением к опорам поперечные по отношению к оси шва напряжения в зоне скругления составляли $\sigma_y = 2,2 \text{ кг/мм}^2$. Ослабление соединения привело к увеличению поперечных напряжений до 13 кг/мм^2 . Продольные напряжения изменились соответственно: $\sigma_x = 5,9 \text{ кг/мм}^2$ в условиях жесткого крепления, $\sigma_x = 9 \text{ кг/мм}^2$ — при ослабленном креплении. При этом главные напряжения σ_1 увеличиваются более чем в два раза и достигают значения, близкого к пределу текучести основного материала. В стенке узлов с радиусом скругления опорного контура 100 мм ослабление крепления при прочих равных условиях нагружения также вызывает повышение уровня главных напряжений. Следовательно, в условиях эксплуатации узлов концевых балок данной конструкции существует возможность изменения максимальных напряжений цикла в широком диапазоне при постоянных характеристиках внешних циклических нагрузок.

Изучение напряженного состояния стенки опорных узлов произ —

ведено в диапазоне нагрузок от 5 тс до 25 тс. Стенка сварного узла в зоне резкого изменения высоты сечения находится в условиях плоского напряженного состояния. Напряжения в контролируемых точках нелинейно зависят от величины внешней нагрузки, причем с увеличением уровня статической нагрузки не всегда происходит увеличение напряжений в одних и тех же точках. При повышении нагрузки до 15 тс более заметно увеличение напряжений в зоне криволинейного шва. По мере дальнейшего повышения уровня нагрузки происходит увеличение зоны действия максимальных напряжений. Величина напряжений в околошовной зоне изменяется незначительно в то время, как напряжения в периферийной по отношению к шву области заметно возрастают.

Направление действия максимальных главных напряжений σ_1 в каждой рассматриваемой точке различно и не совпадает с контуром перехода узла. Продольные и поперечные по отношению к криволинейному шву напряжения не являются максимальными. С увеличением радиуса скругления зоны перехода повышается уровень предельной статической нагрузки, соответствующий началу интенсивного пластического течения материала.

Определение величины и характера напряжений от внешней нагрузки имеет особое значение для зоны сварных соединений, где отмечается также концентрация остаточных напряжений. Несущая способность сварных соединений при циклическом нагружении зависит, в частности, от совместного воздействия напряжений от внешней нагрузки и остаточных сварочных напряжений. Максимальные растягивающие остаточные напряжения, действующие вдоль оси соединения, в зоне шва близки к пределу текучести и не меняют величины при увеличении радиуса контура с 45 до 100 мм. Жесткость поля остаточных напряжений меняется при увеличении радиуса, в основном, за счет уменьшения максимума поперечной составляющей двухосного поля остаточных напряжений.

Полученные результаты подтверждают, что напряженное состояние несущей стенки модели при нагружении аналогично напряженному состоянию вертикальной стенки натурного узла. При достижении остаточными напряжениями растяжения предела текучести возможно пластическое течение материала в условиях циклического нагружения, свойственное малоциклового процессу разрушения.

Непровар по толщине стенки, допускаемый в прямолинейных поясных швах балок, в рассматриваемом криволинейном соединении в условиях плоского напряженного состояния следует считать недопустимым дефектом. В данном случае главные напряжения σ_1 действуют не вдоль несправки, расположенного по оси шва, а под углом к нему и вызывают локальную концентрацию напряжений. Это приводит к раз-

витию трещины от указанного дефекта.

Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ДЕФОРМИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Основное направление исследований связано с изучением сопротивляемости разрушению сварных элементов с учетом взаимодействия таких факторов, как концентрация напряжений от внешних нагрузок с максимальным уровнем циклических напряжений и частотой повторения, определяющими малоцикловую усталость и остаточные напряжения.

Имитация работы материала в опасном месте конструкции при суммарном воздействии напряжений от внешней нагрузки и остаточных напряжений проводилась на образцах.

Для изучения процессов накопления пластических деформаций в зоне геометрического концентратора, основном металле и зоне сварки элементов, отличающихся распределением остаточных напряжений по сечению, применялись плоские образцы из стали Ст.3 с наплавкой в средней части и краевыми надрезами. Регулирование распределения остаточных напряжений производилось технологическими приемами, так, что материал зоны геометрического концентратора не изменял механических характеристик при данных видах обработки.

Кинетика деформирования образцов при циклическом нагружении фиксировалась на стадии, предшествующей появлению макротрещины. В развитии малоциклового разрушения отмечены следующие особенности.

При малоцикловом растяжении происходит пластическая деформация образцов по всему сечению с преимущественным развитием процесса в зоне геометрического концентратора. Предельный уровень пластической деформации, который соответствует появлению трещины, исходящей от геометрического концентратора, для всех рассмотренных групп образцов различен. Это подтверждается, например, сравнением двух групп образцов из рассмотренной серии. Первая группа характеризуется жестким двухосным полем остаточных сжимающих продольных ($\sigma_x = -20 \text{ кг/мм}^2$) и поперечных напряжений ($\sigma_y = -15 \text{ кг/мм}^2$) в средней части образца и остаточными напряжениями растяжения $\sigma_x = -10 \text{ кг/мм}^2$ в зоне концентратора. Вторая группа образцов имела остаточные напряжения в зоне наплавки $\sigma_x = \sigma_y = 25 \text{ кг/мм}^2$ и в зоне концентратора $\sigma_x = -10 \text{ кг/мм}^2$.

Распределение остаточных напряжений σ_x и σ_y в поперечном сечении образцов этой группы аналогично распределению остаточных сварочных напряжений в вертикальной стенке опорного узла балки.

Изменение условий пластического деформирования зоны геометрического концентратора сравнимых групп обусловлено различием в величине и жесткости поля остаточных напряжений по сечению. Местное пластическое растяжение является обычно причиной возникновения остаточных сжимающих напряжений в этой зоне при разгрузке. Степень развития этого процесса с учетом влияния реакции периферийной зоны /область наплавки/ зависит от первоначального распределения остаточных сварочных напряжений по всему сечению образца и от максимального напряжения цикла внешней нагрузки.

При циклическом нагружении образцов первой группы процесс пластического деформирования по сечению сдерживается высоким уровнем остаточных напряжений сжатия в средней части и низким уровнем остаточных напряжений растяжения в зоне концентратора. Перераспределение остаточных напряжений приводит к тому, что процесс малоциклового повреждения развивается под действием пульсирующего цикла суммарных напряжений растяжения (остаточные напряжения и напряжения от внешней нагрузки) в зоне концентратора. Более интенсивному развитию деформационных процессов в образцах второй группы способствует высокий уровень остаточных напряжений растяжения в зоне сварки и низкий уровень остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора. Процесс интенсивного развития малоциклового повреждения в зоне концентратора объясняется действием знакопеременного цикла больших по величине суммарных напряжений.

Образцам первой группы соответствует менее интенсивное развитие деформационных процессов и более низкий уровень предельного значения пластической деформации. Доля усталостных явлений без пластического деформирования в процессе малоциклового разрушения в этом случае по сравнению с образцами второй группы возрастает и долговечность в равных условиях нагружения увеличивается. Пластическое деформирование образцов по сечению оценивалось изменением контролируемой базы $X = 10$ мм. При максимальном напряжении цикла внешней нагрузки $\sigma_{\max} = 25$ кг/мм² отмечены следующие предельные значения удлинения ΔX , соответствующие началу распространения трещины. В зоне наплавки образцов первой группы ($\sigma_{\text{хост}} = -20$ кг/мм², $\sigma_{\text{уост}} = -15$ кг/мм²) $\Delta X_I = 0,032$ мм, в области концентратора ($\sigma_{\text{хост}} = +10$ кг/мм²) $\Delta X_{II} = 0,3$ мм. В образцах второй группы $\Delta X_I = 0,051$ мм ($\sigma_{\text{хост}} = \sigma_{\text{уост}} = +25$ кг/мм²), $\Delta X_{II} = 0,4$ мм ($\sigma_{\text{хост}} = -10$ кг/мм²). В дальнейшем, вплоть до появления трещины, процесс разрушения развивается без существенного увеличения указанных характеристик.

Характеристики малоциклового прочностных рассмотренных групп образцов в координатах $\sigma_{\max} - \lg N$ имеют разный угол наклона. Сле-

довательно, по мере уменьшения уровня максимального напряжения цикла роль пластического деформирования в развитии процесса разрушения снижается и лучшей сопротивляемостью циклическому растяжению обладают образцы с остаточными напряжениями сжатия $\sigma_x = -10 \text{ кг/мм}^2$ в зоне концентратора.

В диапазоне максимальных напряжений цикла от внешней нагрузки $\sigma_{\max} = (30+38) \text{ кг/мм}^2$ образцы с остаточными напряжениями сжатия, в зоне концентратора имели более низкие значения долговечности. Характеристики работоспособности сравниваемых групп образцов в принятых условиях нагружения строились по результатам испытаний на базе $2 \cdot 10^4$ циклов. Действие внешних растягивающих циклических напряжений, соизмеримых с величиной предела текучести основного материала, вызывает деформационные процессы, значительно изменяющие первоначальный уровень остаточных напряжений. Изменение величины остаточных напряжений зависит от уровня внешней нагрузки, максимальных значений и жесткости исходного двухосного поля остаточных напряжений, определяемой отношением продольных и поперечных остаточных напряжений. Долговечность рассмотренных групп элементов в равных условиях нагружения различна. Объективной причиной этого эффекта является различие в распределении остаточных напряжений, изменяющих условия работы материала зоны концентратора. Разрушение образцов исходит от концентратора.

Проведено сравнение работоспособности при малоцикловом растяжении образцов без наплавки и с наплавкой, вызывающей высокий уровень остаточных растягивающих напряжений в зоне сварки и сжимающих напряжений в зоне концентратора. Образцы без остаточных сварочных напряжений имели меньший ограниченный предел выносливости на базе $2 \cdot 10^4$ нагружений.

При низких уровнях максимального напряжения цикла ($\sigma_{\max} < 28 \text{ кг/мм}^2$) от внешней нагрузки более благоприятно сказывается наличие остаточных сварочных напряжений. Циклическое нагружение с повышением напряжений от внешней нагрузки ($\sigma_{\max} > 28 \text{ кг/мм}^2$) приводит к более равномерному деформированию зоны концентратора, а в образцах без наплавки происходит локализация пластических деформаций растяжения в вершине концентратора. Деформирование материала оценивалось изменением толщины, замеряемой на расстоянии 1 мм, 2,5 мм, 5 мм от кромки концентратора. В образцах без остаточных сварочных напряжений отмечен более высокий запас пластичности по сечению образца, истощение которого происходит менее интенсивно при длительном нагружении.

Высокий отпуск, применяемый в ряде случаев для восстановления пластичности материала и снятия остаточных напряжений в сварных элементах, в принятых условиях нагружения снижает характеристики малоциклового прочностного ресурса.

На изменение кинетики деформирования материала различных групп образцов оказывает влияние градиент изменения напряжений у концентратора, зависящий от взаимодействия напряжений от внешней нагрузки и остаточных напряжений.

Чувствительность всех рассмотренных групп образцов к малоцикловым нагрузкам различна. Анализ деформационных характеристик показал, что в определенном диапазоне максимальных напряжений цикла от внешней нагрузки накопление пластических деформаций в зоне концентратора замедляется. В дальнейшем работа материала происходит без заметного деформирования, что свойственно накоплению усталостного повреждения. Переход к вязкому разрушению с прогрессирующим увеличением пластической деформации растяжения от цикла к циклу вплоть до разрушения достигается для рассмотренных групп образцов при различных уровнях максимальной нагрузки.

На основании проведенных исследований установлено, что по величине и знаку остаточных напряжений в зоне геометрического концентратора нельзя однозначно определить положительное или отрицательное их влияние на циклическую прочность элемента. При этом необходимо учитывать концентрацию остаточных напряжений в периферийной зоне и значение максимальной нагрузки цикла. Так, при определенных максимальных напряжениях циклического растяжения наличие остаточных сжимающих напряжений в зоне концентратора сказалось менее благоприятно на работоспособность образцов, чем наличие в этой зоне остаточных напряжений растяжения.

Учитывая идентичность свойств материала в зоне концентратора и геометрическую аналогию образцов, можно констатировать, что накопление пластических деформаций, определяющих процесс малоциклового разрушения, в значительной степени зависит от исходного распределения остаточных напряжений.

Приведенные заключения сделаны на основании изучения работоспособности семи групп образцов и подтверждены как деформационными характеристиками, так и прочностными.

Глава V. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЗЛОВ БАЛОК С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ СВАРНЫМИ ШВАМИ

В известных работах по оценке выносливости сварных металлических конструкций (Гохберг М.М.) отмечается, что в случае необ-

ходимости повышения их работоспособности в условиях циклического нагружения, рациональным является не увеличение размеров элементов, а уменьшение местной концентрации напряжений. С этой позиции в настоящей работе рассматриваются конструктивно-технологические мероприятия по увеличению несущей способности ответственных сварных узлов. На предыдущем этапе исследований показана зависимость развития процесса малоциклового разрушения от характера распределения и величины остаточных напряжений. Особое внимание в данном случае следует уделять несущим сварным соединениям, расположенным в зоне геометрических концентраторов. Неблагоприятные условия работы криволинейного углового соединения заключаются в том, что металл шва и околошовной зоны воспринимает действие остаточных напряжений растяжения, близких по величине пределу текучести, в зоне максимальных напряжений растяжения от внешней нагрузки. При этом отмечены следующие особенности влияния предварительного малоциклового нагружения на долговечность опорных узлов при динамических нагрузках с частотой, свойственной затухающим колебаниям металлоконструкции моста крана. Нагружения узлов с частотой 300 циклов в минуту показали, что предварительное повторно-статическое нагружение является упрочняющим при низких уровнях динамической нагрузки, но по мере повышения максимума нагрузки с высокой частотой происходит более интенсивное развитие усталостного повреждения. В условиях нестационарного нагружения сварной конструкции в процессе эксплуатации развитие трещины, появившейся при высоких уровнях малоциклового нагружения, продолжается и при низких уровнях динамического нагружения (Ирвин, Орован, Иванова В.С.).

Резерв конструктивных и технологических приемов, повышающих долговечность сварных несущих узлов балочных конструкций, заключается в снижении конструктивной и технологической концентрации напряжений.

Группы исследованных моделей соответствовали минимальному (балки с $R = 100$ мм) и максимальному (балки с $R = 45$ мм) значению кривизны контура перехода. В рассматриваемом диапазоне нагрузок ($R_{max} = 12+20$ тс) с частотой повторения 300 циклов в минуту разрушение имеет усталостный характер. Деформационные процессы приобретают существенное значение в малоцикловом диапазоне повторно-статических нагрузок. Характеристики малоцикловой прочности сравниваемых узлов определены в диапазоне максимальных значений нагрузки $R_{max} = 24+32$ тс.

Допустимое уменьшение кривизны контура перехода для концевых балок повышает долговечность узлов при малоцикловом нагружении и

нагрузке с частотой 300 циклов в минуту не с π е, чем в два раза. Характеристики циклической прочности как при малой, так и при высокой частоте повторения параллельны.

Во всех случаях направление развития трещины в зоне радиального перехода узла с угловым сварным соединением определяется не главными напряжениями от внешней нагрузки, а суммарным воздействием продольных и поперечных напряжений от конструктивно-технологического концентратора. В зоне наиболее частых разрушений балок в направлении развития трещины при определенных уровнях нагрузки возникают сжимающие напряжения от внешних нагрузок, в то время как остаточные напряжения являются растягивающими. В связи с этим в зоне будущего разрушения возникает неблагоприятный знакопеременный цикл, характерный для одной из групп рассмотренных образцов.

В данном случае роль технологических сварочных концентраторов (остаточные напряжения и возможные дефекты) настолько существенна, что наиболее эффективными в повышении долговечности узла следует считать меры, направленные на создание не только конструктивной, но и технологической оптимальности узла. Одним из примеров таких мероприятий может быть разделение области действия конструктивных и технологических факторов. С этой целью предложена конструкция несущего узла с опорным элементом таврового сечения вместо гнутой полки из полосы. Угловое сварное соединение заменено стыковым, расположенным в менее напряженной области стенки балки. При этом возможна автоматизация процесса сварки и контроль качества шва. Как показали эксперименты применение таврового опорного элемента с максимально возможным уменьшением радиуса кривизны контура перехода значительно повышает долговечность при динамических нагрузках и исключает появление трещин в несущих срезных узлах при малоцикловом нагружении. Модели балок по соотношению геометрических характеристик, свойственному натурным опорным узлам мостовых кранов, разрушались при максимальном уровне малоцикловой нагрузки $P_{max} = 28$ тс под действием 18 тысяч циклов. Модели балок предложенной конструкции выдерживали под действием аналогичной нагрузки более 80 тысяч циклов без разрушения.

Для концевых балок мостовых кранов проведена экспериментальная оценка разработанного крепления опорного узла с буксой ходового колеса. Испытания при повторно-статическом нагружении балок с предложенной конструкцией крепления показали существенное повышение работоспособности опорных узлов за счет устранения такого очага развития трещин, как вырезы в несущей стенке.

На основании проведенных исследований для повышения проч -

ности опорных узлов крановых балок при циклических нагрузках рекомендуются мероприятия, заключающиеся в снижении концентрации напряжений за счет конструктивных изменений в сочетании со снижением отрицательного влияния технологических концентраторов.

Технология изготовления опорных узлов с предложенным конструктивно-технологическим решением опробована при изготовлении экспериментальной серии сварных узлов. Проведенные исследования определяют необходимость учета в методическом обосновании усталостной прочности несущих узлов сварных конструкций мостовых кранов малоцикловых нагрузок.

Основные выводы

1. В результате анализа усталостных повреждений узлов сварных конструкций балочного и рамного типа установлено, что наименьшая долговечность характерна для элементов, которые работают в условиях конструктивно-технологической концентрации напряжений. Таковыми являются узлы с резким изменением формы, содержащие при этом криволинейные угловые соединения.

2. Экспериментально установлено, что увеличение внешней нагрузки вызывает нелинейное изменение напряжений в несущей стенке опорных балочных узлов мостовых кранов и сопровождается изменением направления главных осей деформаций. Происходящее в процессе циклических нагружений изменение условий крепления опорных узлов кранов к узлам ходовых колес влияет на величину и распределение напряжений аналогично изменению внешней нагрузки.

3. Экспериментально установлено, что появление трещины в зоне концентраторов сварных элементов при малоцикловом растяжении определяется величиной накопленной пластической деформации. Интенсивность процесса накопления пластических деформаций и их предельный уровень, соответствующий появлению макротрещины в равных условиях внешнего нагружения зависит от исходного распределения остаточных напряжений по сечению сварного элемента.

4. Циклическое воздействие растягивающей нагрузки в малоцикловом диапазоне напряжений и наличие остаточных сжимающих напряжений, характерных для данных сварных соединений обуславливает знакопеременный цикл, повышающий интенсивность накопления повреждений, по сравнению с пульсирующим циклом растяжения суммарных напряжений.

5. Показано, что для увеличения долговечности сварных несущих узлов конструкций целесообразно применять приемы по разделению зон максимальной концентрации растягивающих напряжений от внешней нагрузки и остаточных напряжений растяжения.

6. На основании комплекса проведенных исследований разработан и внесен в проект экспериментальной серии вариант опорного узла металлоконструкций мостового крана, являющийся оптимальным с точки зрения совместного влияния конструктивно-технологических факторов на долговечность конструкции. Целесообразность внедрения предложенных рекомендаций по повышению работоспособности сварных несущих узлов при малоцикловых нагрузках обоснована экспериментальным и экономическим анализом.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Вершинский А.В., Прохоров В.Н. Работоспособность некоторых сварных узлов мостовых кранов. В сб. "Подъемно-транспортные и горные машины". Тула, Изд-во Тульского политехнического института, 1972.

2. Вершинский А.В., Прохоров В.Н., Морозова Н.В. Пути повышения несущей способности балочных конструкций мостовых кранов. Тезисы докладов на республиканской конференции "Механизация и автоматизация сварочного производства", Могилев, 1972.