

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И МЕТАЛЛОЕМКОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

С.С. Дмитриченко, О.А. Русанов



ДМИТРИЧЕНКО
Сергей Семёнович

Профессор, доктор технических наук, академик Академии проблем качества РФ. Заведующий лабораторией расчетов и исследований прочности тракторных конструкций ОАО «Научно-исследовательский тракторный институт – НАТИ». Специалист в области усталостной прочности, расчетных и экспериментальных методов обеспечения прочности конструкций мобильной техники. Автор более 300 научных работ и изобретений.

Введение

Во второй половине XX в. сварные конструкции получили широкое внедрение в производстве несущих, ходовых, навесных систем, кабин, кузовов тракторов, автомобилей, самоходных шасси, комбайнов, прицепов, полуприцепов, бульдозерно-рыхлительных агрегатов, погрузчиков, экскаваторов, кранов-трубоукладчиков и других мобильных машин. Их эксплуатация показала, что серийные конструкции с

требуемыми показателями качества способствовали эффективному решению стратегических задач отечественного машиностроения: снижению металлоемкости и трудоемкости изготовления изделий; повышению их производительности и надежности (в первую очередь, долговечности и ремонтпригодности).

В Научно-исследовательском тракторном институте (далее НАТИ) в 1962-2004 гг. совместно с заводами и конструкторскими организациями при участии ряда НИИ и вузов (в



РУСАНОВ
Олег Александрович

Доцент Московского государственного университета инженерной экологии, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории расчетов и исследований прочности тракторных конструкций ОАО «Научно-исследовательский тракторный институт – НАТИ». Специалист в области современных методов расчетов на прочность конструкций мобильных машин. Автор более 30 научных работ.

том числе ИЭС им. Е.О. Патона, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Института механики НАН Украины) выполнены крупномасштабные исследования прочности и металлоемкости сварных конструкций мобильных машин, которые включали следующие основные направления [1, 2, 3, 4]:

- расчеты на квазистатическую прочность при типичных режимах нагружения, которые с развитием вычислительной техники и прикладного программного обеспечения все более широко основывались на современных численных методах: методе конечных элементов (МКЭ) и методе граничных элементов (МГЭ);
- тензометрирование при режимах эксплуатационного нагружения и ускоренных испытаний с выявлением статистических закономерностей распределений амплитуд напряжений и максимальных нагрузок;
- ускоренные испытания на усталость натуральных конструкций на стендах и треках полигонов (6-12 конструкций для предварительной оценки среднего и гамма-процентного ресурса);
- ускоренные испытания 10-60 серийных натуральных изделий на стендах для оценки ресурса, живучести и параметров степенных уравнений кривых усталости;
- анализ и сопоставление экспериментальных и расчетных значений ресурса;
- разработка практических рекомендаций по совершенствованию конструкций для обеспечения требуемых показателей прочности и металлоемкости.

В настоящей статье обобщается опыт исследований квазистатической прочности и металлоемкости сварных конструкций мобильных машин.

Разработка и совершенствование методов анализа сварных конструкций мобильных машин

Создание машин, работающих при переменных случайных нагрузках и обладающих

минимальной металлоемкостью и требуемыми (нормативными) показателями ресурса, продолжает оставаться актуальной научно-технической проблемой. Усталостные разрушения (наряду с износом) являются основным видом повреждений в конструкциях. Но расчеты на усталость часто не обеспечивают приемлемую точность оценок ресурса. Существуют объективные и субъективные причины сегодняшней нерешенности этой проблемы, к которым можно отнести неполноту научных знаний о существе явления усталости, недостаточный объем исследований влияния конструкторско-технологических факторов на долговечность натуральных конструкций, высокую стоимость и трудоемкость ресурсных испытаний сложных натуральных изделий, кризис в современном отечественном машиностроении. В итоге, создание новых конструкций без достоверной оценки их ресурса стала причиной снижения качества машин, несмотря на многообразие методов обеспечения заданного ресурса, разработанных в период расцвета отечественной науки о надежности в 1970-1990 гг.

Применение традиционных методов расчета для сварных конструкций, связанных с использованием высоких значений коэффициентов запаса прочности при расчетах на квазистатическую прочность и оценка характеристик сопротивления усталости деталей по результатам испытаний стандартных образцов материалов с типичными концентраторами напряжений (надрезами, отверстиями и галтелями) или уменьшенных моделей деталей, приводят к значительным погрешностям при прогнозировании ресурса конструкций, к излишней металлоемкости и преждевременным отказам.

Обычно для оценки металлоемкости конструкций машин используют такие понятия [1]. **Металлоемкость** – расход металла, необходимый для производства и технической эксплуатации изделия (ГОСТ 14.205-83). **Производственная металлоемкость** – расход металла на производство изделия, включающий конструкционную массу и технологические отходы.

Эксплуатационная металлоемкость – расход металла на производство запасных частей для устранения отказов и капитальных ремонтов (термин предложен академиком А.И. Целиковым). **Удельная металлоемкость** – отношение металлоемкости к единице параметра, определяющего полезный эффект (позволяет одновременно учитывать производственную и эксплуатационную металлоемкости, имеющая физический смысл, применительно к машинам, в расходе металла на единицу выполняемой работы, кг/Дж). Существующие тенденции, стремящиеся к примерно линейному увеличению массы машин и комплекта запасных частей с возрастанием мощности, диктуют необходимость ограничения металлоемкости конструкций.

Снижение металлоемкости машин осуществляют совершенствованием конструкций (повышением точности расчетных методов оценки нагрузок и прочности, применением современных методов ускоренных испытаний, созданием конструкций новых принципов действия и др.), внедрением прогрессивных малоотходных и упрочняющих технологий, заменой материалов деталей. Правильный выбор материалов – задача оптимизации по большому числу критериев, решаемая методами многокритериальной оптимизации. Ориентация на применение дешевых материалов препятствует не только снижению материалоемкости, но и повышению ресурса машин.

Себестоимость продукции, вопреки распространенному мнению, не может рассматриваться как единственный показатель эффективности производства. Имеется немало примеров сочетания низкой себестоимости машин с избыточной массой и чрезмерными затратами на поддержание их в работоспособном состоянии. Вследствие этого эффективность машин необходимо оценивать системно – с учетом всех затрат на создание, производство и обеспечение работоспособности за срок службы, отнесенных к единице выполняемой работы. Подобный подход предусмотрен ГОСТом 27782-88.

Избыточная масса машин отрицательно влияет на их технические характеристики. Так, при транспортных работах она увеличивает расход топлива. Например, при эксплуатации универсальных колесных тракторов расчетная экономия топлива составляет примерно 800 кг в год при уменьшении массы трактора на 1 т.

На поддержание работоспособности некоторых машин расходуется больше металла, чем на их производство. Одной из основных причин этого является недостаточный уровень равнопрочности конструкции в вероятностном смысле. Например, по данным НАТИ, за период от ввода в эксплуатацию до капитального ремонта сложные отказы по основным узлам и агрегатам гусеничных тракторов класса 3 распределяются так: двигатель – 47,8 %; ходовая система – 18,6 %; трансмиссия – 15,9 %; электрооборудование – 11,2 %; гидросистема – 5,1%; кабина – 1,4 %. В НАТИ по результатам выполненных исследований составлен перечень неравнопрочных металлоемких агрегатов, узлов, деталей тракторов.

Известно, что ресурс деталей должен существенно превышать заданный уровень ресурса узла и машины. Это следует из вероятностного характера распределения ресурса, который обусловлен рассеиванием свойств материала, отклонениями от размеров и технологических процессов, случайным характером нагрузок на детали, различиями условий и режимов эксплуатации, системой контроля качества и рядом других причин. Повышение ресурса деталей, лимитирующих равнопрочность, является одним из основных реальных направлений увеличения срока службы машин, уменьшения расхода материалов и обеспечения требований инженерной экологии производства. Например, при достигнутом в 1990 г. уровне равнопрочности тракторов увеличение их срока службы на один год требовало втрое меньше дополнительного расхода металла (вчетверо меньше дополнительного расхода проката), чем производство новых тракторов в объеме, соответствующем приросту пар-

ка тракторов за счет увеличения срока службы [1].

Металлоемкость машин определяют, в основном, на стадии проектирования. При этом используют два подхода:

1) расчеты деталей и узлов на прочность на основе априорных данных о характеристиках сопротивления усталости материалов и статистических закономерностях эксплуатационного нагружения аналогов конструкций;

2) анализ опыта конструирования, испытаний и эксплуатации аналогов, имевших отказы из-за недостаточной прочности деталей и узлов, и доработка конструкций по итогам анализа.

На стадии проектирования выбирают материалы и методы упрочнения, устанавливают размеры деталей опытных изделий, предъявляемых на ресурсные испытания. В ходе испытаний, а затем и при серийном производстве, в конструкцию вносят изменения. Однако опыт показывает, что большинство из них направлено на повышение надежности «слабых» конструктивных элементов, а излишняя металлоемкость нередко остается до снятия машин с производства.

Такое положение объясняется сложившейся практикой конструирования и доводки машин, несовершенством применяемых методов расчета на прочность, слабостью экспериментальных баз заводов и конструкторских бюро (КБ).

Совершенствование методов расчета и испытаний на прочность деталей машин и, в частности, мобильных машин – одно из главных научных направлений прошлого века. Все крупные предприятия и конструкторские организации автомобильного, тракторного, сельскохозяйственного и дорожно-строительного машиностроения имели соответствующие специализированные подразделения. К сожалению, к 2005 г. многие предприятия практически ликвидировали эту службу.

Изучение практики конструирования показало, что число рассчитываемых на прочность деталей не достигает 25 % общего числа наи-

менований. В основном проводят расчеты на статическую прочность, а расчеты на усталость выполняют для ограниченного числа деталей (например, кривошипно-шатунной группы двигателей внутреннего сгорания, подшипников, шестерен, валов, торсионов, пружин, рессор, карданов, балок ведущих мостов, осей колес и катков, рам, кабин, деталей систем управления движением).

Опыт НАТИ подтвердил эффективность применения современных методов расчетов и испытаний на прочность, основанных на достижениях науки о прочности; широком использовании МКЭ и МГЭ, методов вычислительного эксперимента и имитационного моделирования нагруженности; статистической оценки характеристик сопротивления усталости натуральных деталей; формирования программ ускоренных испытаний на усталость, воспроизводящих типичные случайные процессы нагружения; обоснованного выбора критериев предельного состояния деталей и узлов; вероятностного подхода к назначению коэффициентов запаса прочности с учетом основных влияющих факторов; использования априорных статистических закономерностей нагружения и ресурса деталей.

Основные этапы исследования конструкций мобильной техники

Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) с использованием МКЭ и МГЭ является одним из основных расчетов на квазистатическую прочность конструкций. В расчетах особое внимание необходимо уделять обоснованному выбору режимов нагружения и расчетных схем моделей. Для одной и той же конструкции может быть принято несколько расчетных схем в зависимости от целей решаемой задачи [5].

Выполнение таких расчетов позволяет:

- своевременно выявить зоны с недопустимо высоким уровнем напряжений;
- проработать варианты конструкций с требуемым уровнем напряжений;

- сократить число зон с высоким уровнем напряжений – потенциальных очагов появления усталостных трещин;
- сократить сроки доводки и постановки на производство новых конструкций.

Для получения приемлемой точности расчетов и обеспечения требуемых показателей прочности мобильных машин проводимые в НАТИ исследования включают следующие этапы.

1. Проведение анализа типичных режимов нагружения и выявление режимов, при которых уровень напряжений в деталях может достигать опасных величин, на основе опыта экспериментальных (в первую очередь, тензометрических) исследований конструкций.

2. Обоснование расчетной схемы, отражающей взаимодействие основных узлов и деталей несущей системы с ходовой и навесной системами и учитывающей существенные (на основе сформулированных допущений) нагрузки на несущую систему при выявленных режимах нагружения, опасных для прочности машины.

3. Разработка конечно-элементной модели несущей системы (при расчете по МКЭ) с максимально возможным учетом особенностей геометрии конструкций, ожидаемого уровня градиентов напряжений и контактного взаимодействия деталей.

4. Оценка НДС элементов конструкции по результатам расчетов с помощью универсального программного комплекса МКЭ.

5. Определение коэффициентов запаса прочности

$$n = \sigma_T / \sigma_i,$$

где σ_T – предел текучести материала детали; σ_i – интенсивность напряжений для высоконапряженных областей конструкции несущей системы.

Выявление областей, для которых значения расчетного коэффициента запаса прочности меньше нормативного.

6. Разработка обоснованных рекомендаций по совершенствованию рассматриваемой конструкции на основе исследования НДС нескольких предложенных конструктивных вариантов

для повышения прочности деталей и узлов методом вычислительного эксперимента на основе улучшенных конечно-элементных моделей.

Важным условием обеспечения приемлемой точности расчетов на прочность является четкая формулировка основных положений и допущений, принятых при разработке расчетных схем и обосновании режимов нагружения.

По опыту тензометрических исследований большого числа несущих, ходовых и навесных систем мобильных машин, проведенных в НАТИ, высокий уровень напряжений в деталях наблюдается при определенных режимах движения.

Для сельскохозяйственных тракторов:

- движение по разбитым грунтовым дорогам и полям поперек борозд с наиболее тяжелыми навесными орудиями (плуг, культиватор) на скоростях движения более 2,4 м/с;
- движение с груженными прицепами или полуприцепами по разбитым грунтовым дорогам и полям поперек борозд на скоростях движения более 2,4 м/с;
- крутые повороты гусеничных тракторов в конце гонов на поворотных полосах полей.

Для промышленных тракторов:

- «стоп-режим» при бульдозировании и заземлении одного края отвала бульдозера во время выглубления отвала;
- движение откатом после цикла рыхления скального грунта при поднятом бульдозере и рыхлителе;
- рыхление скального грунта при поднятом отвале бульдозера;
- заглубление зубьев рыхлителя в скальный грунт в начале цикла рыхления при поднятом отвале бульдозера;
- крутые повороты трактора с поднятым бульдозером и рыхлителем при движении по мягкому и скальному грунту.

Для грузовых автомобилей, прицепов и полуприцепов:

- движения по разбитым грунтовым дорогам и разбитому асфальтовому шоссе, при которых имеют место значительные дефор-

мации кручения лонжеронов рам и значительные продольные усилия на осях колес (при взаимодействии их со случайно расположенными неровностями типа «порог»).

Программный комплекс «Каприс-Динамика»

В НАТИ для оценки прочности конструкций используется отечественный программный комплекс «Каприс-Динамика», разработанный с применением МКЭ и МГЭ [6]. Он предназначен для расчетного анализа конструкций по статической прочности, динамике, а также устойчивости упругих, упруго-пластических, геометрически нелинейных систем. В комплексе используются различные типы конечных элементов для решения задач в двумерной и трехмерной постановке. Комплекс располагает средствами автоматизированного создания и визуализации расчетных моделей, графического представления результатов. В нем реализованы различные методы решения систем линейных алгебраических уравнений (прямые и итерационные), решения проблемы на собственные значения, методы исследования динамики конструкций. Для большинства задач имеется возможность выбора альтернативных вариантов расчетных схем.

Программный комплекс создавался и совершенствовался в процессе решения практических задач оценки прочности конструкций мобильной техники. Необходимо принимать во внимание определенную специфику расчета таких конструкций в части формулировок задач, выбора расчетных схем и методики моделирования, использования опыта расчетных и экспериментальных исследований и т.д. И это учтено в возможностях программы.

На ранних этапах создания программного комплекса основной проблемой была реализация таких расчетных алгоритмов, которые были бы способны обеспечить решение задачи при ограниченных ресурсах компьютеров. Поэтому в программе уделено большое внимание алгоритмам понижения порядка матриц, в том числе суперэлементному решению динамических

задач на основе способа «динамической конденсации». Разработаны новые методы решения динамических задач, основанные на смешанных формах представления неизвестных параметров, когда часть неизвестных является смещениями по степеням свободы узлов модели, другая часть – смещениями по нормальным координатам, в качестве которых используются формы собственных колебаний подконструкций с закрепленными поверхностями их соединения друг с другом. Такие методы позволяют значительно сократить порядок динамической задачи без заметной для практических целей потери динамических свойств по сравнению с полной моделью. Для задач динамики реализованы алгоритмы исследования во времени неустановившихся процессов (прямые и с разложением по тонам), методы расчета установившихся вынужденных колебаний.

В настоящее время, по мере развития компьютерной техники, возможности выполнения расчетов возросли. На первый план вышли задачи быстрого и удобного создания сложных расчетных моделей, максимального визуального контроля всех шагов построения конечно-элементной модели, графического представления полученных результатов. Появилась практическая возможность обеспечить решение сложных нелинейных задач. Для плоских и пространственных задач теории упругости в программу добавлены возможности выполнения расчетов с учетом нелинейных свойств материала. Для конструкций с использованием стержневых и оболочечных элементов разработаны и запрограммированы алгоритмы геометрически нелинейного расчета при больших величинах смещений и деформаций. Особенностью предложенных алгоритмов является их устойчивость при сложных случаях нелинейности (например, в области точек ветвления решения). Программа допускает возможность исследования кривых равновесных конфигураций, расчет геометрически нелинейных колебаний.

При использовании стержневых элементов жесткостные и массовые характеристики

часто удобнее задавать в виде данных о форме профиля поперечного сечения стержня. Для заданной формы профиля программа позволяет автоматически определять координаты центра площади сечения, ориентацию главных осей, моменты инерции сечения. Форма стержня может быть описана внутренними средствами или импортирована из CAD-систем. В частности, создана база данных по профилям отечественного металлопроката.

С помощью программного комплекса разработаны конечно-элементные модели несущих систем тракторов с достаточно подробным отражением специфики расчетных конструкций. Учтены особенности геометрии корпусных узлов (стенки, фланцы, перегородки, отверстия, оребрение), смоделированы болтовые соединения, учтено взаимодействие корпусных элементов с деталями трансмиссий. Расчетные конечно-элементные модели имеют высокий порядок степеней свободы (до 1,5 млн). Это обеспечивает приемлемую точность оценки НДС.

Для конструкций мобильной техники характерны случайные процессы нагружения. В рас-

четах такие нагружения классифицируются как квазистационарные широкополосные с нормальным распределением ординат. Выполненные расчеты позволили получить картины распределений напряжений и деформаций в исследуемых системах, на основе которых выявлены зоны с высоким уровнем напряжений. Проведенное сопоставление с результатами тензометрических исследований подтвердило приемлемую точность расчетов.

Расчетные методы использовались в НАТИ в 1996-2005 гг. при прочностном анализе сварных конструкций ряда мобильных машин. В качестве примера на рис. 1 приведена растровая картина уровней напряжений в сварной конструкции рамы трактора Т-170 (желтым цветом показаны наиболее напряженные зоны). Анализ НДС выполнен для несущих систем погрузчика П-4 (рис. 2), трактора нового поколения Т-3 класса 15 (рис. 3), несущей системы колесного сельскохозяйственного трактора класса 3 ВК-170 ВгТЗ-НАТИ (рис. 4), стрел кранов-трубоукладчиков ТР-12, ТР-20 (конструкция ОАО «ЧТЗ») и других сварных металлоконструкций.

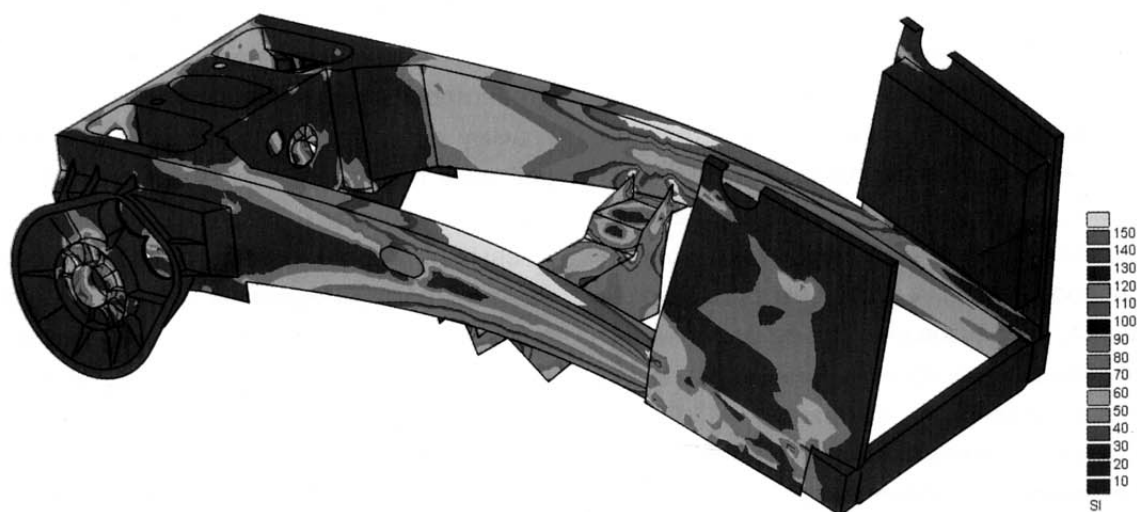


Рис. 1. Рама с корпусом заднего моста бульдозерно-рыхлительного агрегата Т-170 (конструкция ОАО «ЧТЗ»). Расчет по МКЭ: цветами выделены уровни интенсивности напряжений (МПа) в элементах конструкции

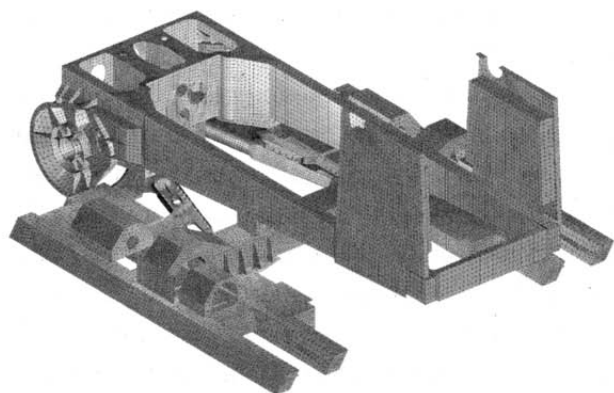


Рис. 2. Конечно-элементная модель несущей системы погрузчика П-4 (конструкция ОАО «ЧТЗ»)

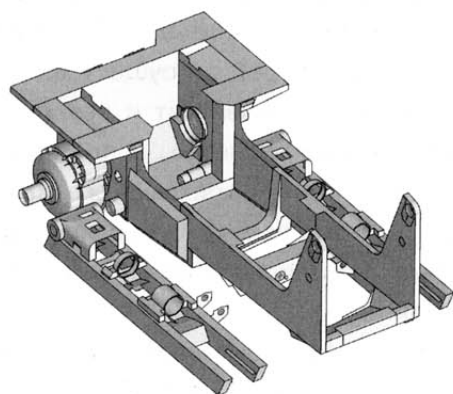


Рис. 3. Модель несущей системы трактора нового поколения Т-3 (конструкция ОАО «ЧТЗ»)

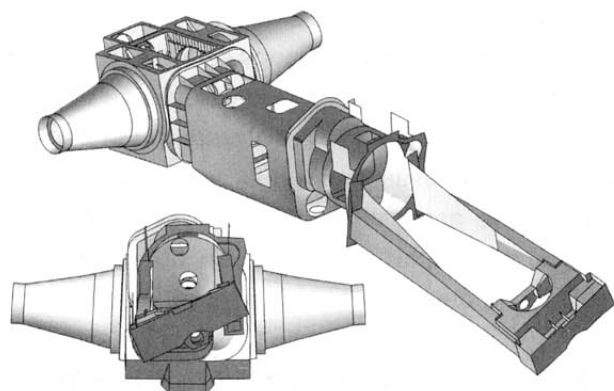


Рис. 4. Модель несущей системы сельскохозяйственного трактора ВК-170 ВгТЗ-НАТИ

На основании выполненных расчетов рекомендованы практические меры по обеспечению необходимых величин коэффициентов запаса прочности и вероятности неразрушения. Так, для тракторов конструкторско-технологические меры (усиление узлов тележек гусениц, замена углеродистых сталей на низколегированные стали для ряда деталей рамы и корпуса заднего моста, усиление контроля режима сварки в наиболее нагруженных швах) внедрены в производство на ОАО «ЧТЗ».

Особенности расчетного анализа НДС сварных конструкций

Напряженное состояние в сварных конструкциях с технологическими дефектами в виде раковин, подрезов и цепочек пор чаще и раньше достигает предельного состояния, обусловленного трещинами предельной длины или недопустимыми деформациями, чем в конструкциях со швами без дефектов. Развитие современных методов оценки НДС сложных сварных конструкций (типа рам, корпусных узлов, балочных и оболочечных металлоконструкций мобильных машин) позволяет рассматривать эту прикладную задачу, как решаемую достаточно точно.

По данным исследований, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и НАТИ [7, 8], в сварных швах металлоконструкций отмечены различные по размерам дефекты, в окрестности которых при эксплуатационном нагружении концентрация напряжений может быть значительной (особенно в зонах подрезов при недостаточно отработанных технологических процессах ручной сварки электродами и полуавтоматической сварки в среде углекислого газа).

Особенности конструкций рамы и корпуса заднего моста промышленного трактора рассмотрены в работе [4]. Поскольку в серийном производстве весьма сложно полностью избежать таких дефектов, для наиболее нагруженных сварных соединений заднего моста с рамой с помощью МКЭ и МГЭ определены зна-

чения теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ и выявлены закономерности влияния геометрии дефектов на его значения.

При выполнении расчетов были приняты такие положения и допущения.

1. Размеры дефектов сварных швов приняты по данным МГТУ им. Н.Э. Баумана и на основании исследований дефектов сварных швов в рамах тракторов ДТ-75М (ВгТЗ), тракторов Т-4М (АТЗ), проведенных в НАТИ [7, 8].

2. Рассмотрены два вида наиболее распространенных типичных сварных соединений: нахлесточное (с лобовым угловым швом) и стыковое.

3. Для учета влияния на НДС конструкции дефектов сварки в виде подрезов вычислительная процедура разбита на 2 этапа. На первом этапе, на основе МКЭ выполнен анализ НДС сварных узлов [4] без учета концентраторов с достаточно подробным отражением особенностей конструкции; при этом выявлены зоны, в которых дефекты сварки могут представлять опасность. Так, в наиболее напряженных зонах рамы трактора Т-170 (см. рис. 1) наблюдается заметная концентрация напряжений, вызванная дефектами сварных швов в соединениях основных несущих листов с приваренными элементами. На втором этапе, для выявленных зон выбраны типичные сварные соединения с возможными дефектами. Из конструкции узлов выделены фрагменты, для которых составлены расчетные схемы, моделирующие НДС.

4. Влияние дефекта на НДС корпусного узла быстро уменьшается по мере удаления от него точки наблюдения, поэтому размеры фрагмента выбираются достаточными для того, чтобы напряжения на границе практически не отличались от тех, которые имели бы место при отсутствии дефекта.

5. Не учитывались неоднородность механических свойств и структуры металла, термическое влияние сварки и начальные деформации в шве в связи с тем, что для сварных корпусных узлов трактора применены малоуглеро-

дистые и низколегированные стали (т.е. анализируется геометрическая концентрация напряжений).

На втором этапе анализа НДС в области дефекта в качестве расчетных методов применены: МКЭ – в рамках плоской задачи теории упругости и МГЭ – в рамках объемной задачи. При выполнении многовариантных расчетов с различными параметрами дефектов плоские параметрические модели МКЭ удобны тем, что не требуют много счетного времени на каждый из вариантов. Однако, чтобы избежать грубых ошибок в оценке напряженного состояния в окрестности дефекта, которое является сложным и неоднородным, необходимы контрольные исследования распределения напряжений в объемной постановке. Объемные задачи требуют существенно больших вычислительных затрат и неудобны для многовариантных расчетов. В предложенной методике для оценки трехмерного НДС выбран МГЭ, с помощью которого исследуются некоторые из вариантов сочетания параметров дефектов.

Расчет по МГЭ выполняется с помощью программных модулей из состава комплекса «Каприс-Динамика», реализующих прямой вариант МГЭ. С их помощью возможно моделирование массивных объемных тел, имеющих внутри или на поверхности небольшие полости или трещины, в связи с чем можно решать задачи механики разрушения, проводить исследование концентрации напряжений в дефектах сварных швов. Граница моделируемой области может быть конечных размеров или бесконечной, односвязной или многосвязной. Вычислительные затраты могут быть существенно сокращены, если исследуемый объект имеет плоскости симметрии.

Определение коэффициента концентрации напряжений в сварных швах с дефектами

Расчетные схемы. Для определения значений коэффициента концентрации напряжений α_σ в сварных швах в окрестности дефек-

тов-подрезов использованы расчетные схемы МКЭ плоского напряженного состояния с треугольными симплекс-элементами. Схемы отображают наиболее напряженные фрагменты конструкции с дефектами лобовых (рис. 5, а) и стыковых (рис. 5, б) швов. По условиям симметрии моделируется только половина сечения шва. В плоскости симметрии вводятся соответствующие граничные условия. В расчете принималось, что фрагмент находится под действием равномерно растягивающей нагрузки с напряжениями σ_0 по линии контура фрагмента, имитирующей сечение свариваемого листа на достаточном удалении от сварного шва.

Горизонтальный размер в плане (в направлении действия нагрузки) фрагментов свариваемых листов выбран 50 мм. Толщина листов, свариваемых стыковым швом, составляет 10 мм. Лобовой шов образован в соединении основного листа толщиной 20 мм и накладки такой же толщины. По данным наблюдений в НАТИ принято, что подрез расположен вдоль границы наплавленного металла по краю шва.

Поверхность дефекта считается цилиндрической с осью, параллельной линии шва. Рассмотрены варианты дефектов при значениях радиуса $r_{\text{деф}}$ цилиндрической поверхности, рав-

ными: 0,3; 1 и 2 мм – для лобового шва, 0,3; 1 мм – для стыкового шва. Относительное вертикальное расположение центра окружности определяет заглубление h дефекта (см. рис. 5). Для каждого из указанных значений $r_{\text{деф}}$ варьировалось значение заглубления h в пределах от 0 до 100 % радиуса $r_{\text{деф}}$ с шагом 20 %. При этом горизонтальная координата b центра окружности для всех вариантов оставалась неизменной и определялась величиной катета сварного лобового шва (8 мм) или полушириной стыкового шва (4 мм).

В конечно-элементной модели стыкового шва учитывалась наплавка металла. Принято, что ее форма в поперечном сечении ограничена дугой окружности радиуса $R = 8$ мм. Выступление верхней точки шва над поверхностями свариваемых деталей не превышало 1 мм. Заглубление $h = 0$ соответствует плавному сопряжению горизонтальных линий детали и окружности контура наплавленного металла.

В модели лобового шва заглубление $h = 0$ соответствует скруглению указанным радиусом угла, образованного горизонтальной линией поверхности детали и наклонной линией шва. При заглублении $h = r_{\text{деф}}$ центр окружности в сечении дефекта располагался на горизонтальной линии, а наклонная линия шва являлась касательной к окружности. Угол наклона линии

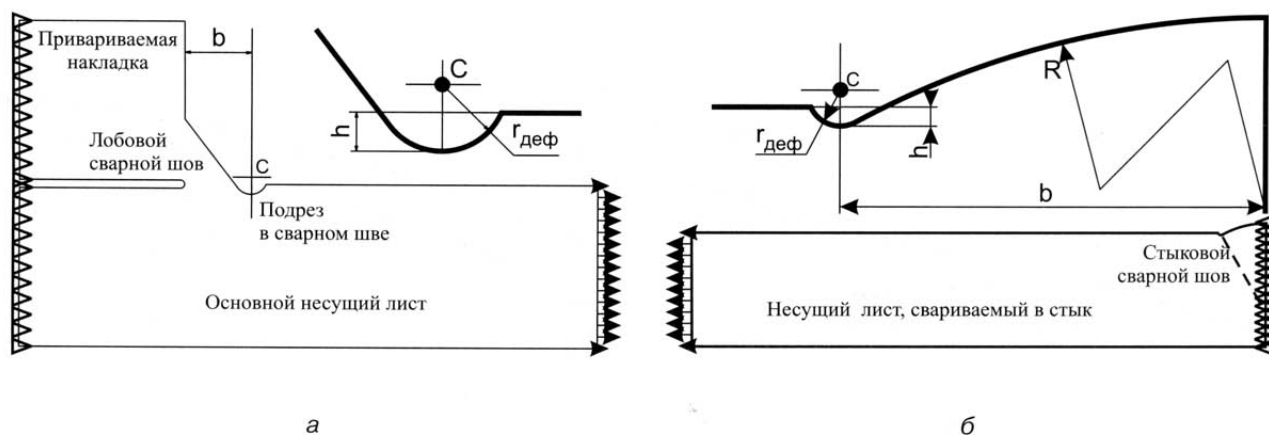


Рис. 5. Расчетная схема МКЭ для сварных швов с дефектом:

а – лобовой шов; б – стыковой шов

шва к горизонтали увеличивался по мере возрастания h .

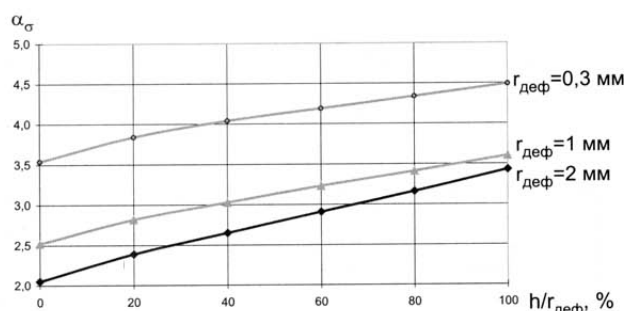
Поскольку МКЭ является методом приближенного решения краевых задач теории упругости, на получаемые результаты влияет степень дискретизации исследуемой области. Используемые расчетные модели МКЭ содержали от 6000 до 13000 узлов со сгущением вблизи концентратора. Для исследования НДС лобового шва формировались расчетные схемы с размерами сторон треугольных конечных элементов по образующей дуге дефекта: 0,02 мм – для $r_{\text{деф}} = 2$ мм; 0,015 мм – для $r_{\text{деф}} = 1$ мм и $r_{\text{деф}} = 0,3$ мм. При анализе стыкового шва размеры сторон треугольных конечных элементов по образующей дуге дефекта составляли 0,0075 мм для всех вариантов значений $r_{\text{деф}}$.

Результаты плоских расчетов по МКЭ проверены с помощью МГЭ в трехмерной постановке. При этом оценивалась неравномерность распределения напряжений по длине раковины и степень влияния вершин подреза. Рассмотрен вариант лобового сварного соединения с дефектом на передней кромке. Радиус цилиндрической поверхности дефекта $r_{\text{деф}} = 1$ мм, величина заглубления $h = 0,6r_{\text{деф}}$. Принято, что подрез распространяется на всю длину передней кромки шва (46 мм), а также, что поверхность торцев раковины является сферической. Объемная расчетная модель МГЭ сфор-

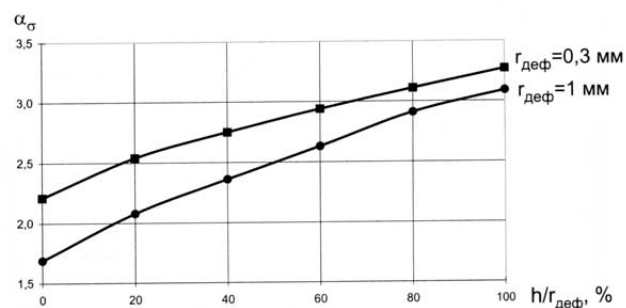
мирована с учетом симметрии задачи относительно двух плоскостей. Большая часть ее степеней свободы сосредоточена на поверхности дефекта для того, чтобы по возможности более точно отразить поля напряжений и деформаций с высокими градиентами.

Анализ результатов расчетов. Полученные с помощью МКЭ графические зависимости коэффициента α_σ от радиуса $r_{\text{деф}}$ и степени заглубления h представлены на рис. 6, а – для лобового шва, на рис. 6, б – для стыкового. Для рассмотренных вариантов диапазон изменения значений α_σ составляет: для лобового шва $\alpha_\sigma = 2,0 - 4,5$; для стыкового $\alpha_\sigma = 1,7 - 3,3$. Максимальные значения интенсивности напряжений имеют место на поверхности дна подреза, и напряжения уменьшаются с высоким градиентом при смещении точки наблюдения внутрь объема металла.

Сравнение результатов расчета по МГЭ трехмерного НДС в области дефектов с результатами плоского решения по МКЭ для варианта лобового соединения $r_{\text{деф}} = 1$ мм, $h = 0,6r_{\text{деф}}$ показывают, что близкими в обоих подходах являются величины максимальных перемещений в направлении действия растягивающей нагрузки. Отличия составляют не более 1,5 %. Практически совпадают также значения периферийных напряжений. Однако в области концентрации напряжений имеют место качественные отличия. В объемном варианте максималь-



а



б

Рис. 6. Зависимости коэффициентов концентрации напряжений α_σ от геометрических параметров дефектов: а – лобовой шов; б – стыковой шов

ный уровень относительной интенсивности напряжений σ/σ_0 меняется по длине раковины (от 3,5 – в средней части раковины до 2,4 – в сечениях, близких к торцам). Одновременно в сечениях, перпендикулярных оси дефекта, имеет место ненулевая компонента напряжений σ_y , достигающая $0,85\sigma_0$ на дне подреза в средней части раковины. Для сравнения в рассмотренном варианте геометрии шва с дефектом расчет с помощью МКЭ плоского напряженного состояния дал величину $\alpha_\sigma = 3,2$. Это ниже, чем в МГЭ, приблизительно на 10 %. Указанная величина может являться оценкой точности представленных данных.

Оценка с помощью МКЭ и МГЭ коэффициентов концентрации напряжений α_σ с учетом возможных дефектов сварки показала, что для двух типичных сварных соединений (лобового шва приварки накладки к несущему элементу конструкции и стыкового шва деталей) максимальные значения α_σ соответственно равны 4,5 и 3,3 при минимальном значении радиуса подреза $r_{\text{деф}} = 0,3$ мм в зоне перехода шва к основному металлу. Выявленные закономерности изменения значений α_σ в зависимости от геометрических параметров подрезов свидетельствуют о существенном влиянии технологических дефектов сварки на напряженное состояние вблизи сварного шва.

Следует отметить, что высокий уровень концентрации напряжений характерен для весьма малой локальной зоны, в которой произойдет превышение предела текучести материала σ_T . По критерию пластичности Мизеса-Губера [9] коэффициент n для этой зоны будет ниже единицы:

$$n = \sigma_T / \sigma_i < 1.$$

Учитывая высокие пластические свойства применяемых малоуглеродистых и низколегированных сталей, а также малые размеры зон высоких напряжений, несмотря на локальную пластическую деформацию материала, трещин при однократном приложении предельных нагрузок не появится. Пластические деформации и величины напряжений будут возрастать при

повторных предельных нагрузках, что в дальнейшем может привести к исчерпанию пластичности материала и появлению трещин усталости. Этот вывод подтверждается результатами наблюдений, выполненных в НАТИ и показавших, что трещины в опасных зонах несущих систем тракторов возникают и развиваются после нескольких лет эксплуатации. Задача прочности подобных конструкций должна решаться по результатам упруго-пластического анализа и расчетов с использованием скорректированной линейной гипотезы накопления усталостных повреждений по методике НАТИ [3, 4]. Решение этой сложной задачи является предметом отдельного исследования.

По результатам расчетов предложены практические рекомендации по обеспечению прочности конструкции ОАО «ЧТЗ», связанные с расширением применения прогрессивных низколегированных сталей (09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД и др.), уменьшением предельных нагрузок за счет обоснованного назначения максимального давления в гидроцилиндрах подъема отвала бульдозера, повышением качества сварных швов, для чего потребовалось изменить технологические режимы сварки.

Заключение

По мере накопления опыта методы оценки квазистатической прочности конструкций мобильной техники совершенствуются для повышения точности расчетов. Эта цель достигается за счет обоснованного усложнения расчетных схем и конечно-элементных моделей, более полного учета особенностей нагружения и взаимодействия деталей несущих, ходовых и навесных систем, корпусных узлов трансмиссий конструкций. В настоящее время разработанные методы являются эффективным инструментом прочностного анализа сложных сварных и сварно-литых конструкций, позволяющего обеспечивать нормативные значения коэффициентов запаса прочности и удельной металлоемкости.

Литература

1. Дмитриченко С.С., Ротенберг В.А. Металлоемкость машин массового производства. – М.: Машиностроение, 1991. – 41 с.
2. Дмитриченко С.С. Методы обеспечения требуемых показателей металлоемкости и долговечности мобильных машин // Вестник машиностроения. 2003. №9. С. 23-28.
3. Дмитриченко С.С. Металлоемкость и закономерности накопления усталостных повреждений деталей машин // Тяжелое машиностроение. 2004. №5. С. 22-25.
4. Дмитриченко С.С., Русанов О.А., Борисов Ю.С. и др. Расчет на прочность с оценкой вероятности неразрушения несущей системы трактора // Вестник машиностроения. 2001. №12. С. 28-32.
5. Феодосьев В.И. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1969. – 176 с.
6. Русанов О.А. Анализ прочности конструкций машин с использованием современных численных методов // Тракторы и сельхозмашины. 2002. № 2. С. 34-36.
7. Дмитриченко С.С., Русанов О.А. Влияние технологических дефектов сварки на концентрацию напряжений в металлоконструкциях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. № 3. С. 41-46.
8. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
9. Биргер И.А., Шор В.Ф., Иосилевич Г.В. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.