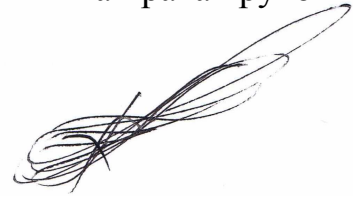


На правах рукописи



Шлепетинский Антон Юрьевич

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАШИН С НЕПРОВАРАМИ В СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Специальность: 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные
машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Манжула Константин Павлович

Официальные оппоненты: Петинов Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», профессор
кафедры «Сопротивление материалов»,
заслуженный деятель науки Российской
Федерации
Попов Валерий Анатольевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВПО «ПГУПС», заведующий
кафедрой «Подъемно-транспортные, пу-
тевые и строительные машины»

Ведущая организация: филиал ОАО "Корпорация "СПУ-ЦКБ-ТМ "КБ-Тяж-Маш" в г. Санкт-Петербурге

Защита состоится «19» февраля 2013 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп.1, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «СПбГПУ».

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Д.Е.Бортяков

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одной из важнейших задач проектирования и изготовления металлоконструкций подъемно-транспортных и строительных машин в условиях экономической конкуренции является обеспечение несущей способности по критериям усталостной прочности, долговечности и трещиностойкости. Усталостное разрушение металлоконструкций подъемно-транспортных, строительных машин, как правило, происходит по сварным швам, которые характеризуются концентрацией напряжений и деформаций в околошовной зоне, действием сварочных остаточных напряжений, наличием конструктивно-технологических непроваров. Наличие в металлоконструкциях непроваров может быть вызвано конструктивной невозможностью полного проплавления корня шва по причине малых габаритов узла, скученности набора свариваемых элементов, а также стремлением уменьшить конечную стоимость машины за счет упрощения ряда технологических процессов сварки. Примерами могут служить сварные соединения в балках коробчатого сечения мостовых кранов и перегружателей, когда выполнить шов с внутренней стороны стенки не представляется возможным, в рамах строительных машин со сложной конфигурацией и др. Непровары заложены в стандартах на сварку, например, в нахлесточных соединениях, в угловых швах с отбортовкой, угловых и тавровых односторонних швах. Трещины от непроваров зафиксированы в стрелах контейнерных перегружателей, в рукоятях экскаваторов, элементах крепления подтележечных рельсов и др. элементах грузоподъемных и строительных машин.

Вопросам усталости сварных соединений в конструкциях подъемно-транспортных и строительных машин посвящено большое количество исследований, однако изучению образования трещин от непроваров уделено недостаточное внимание. В стандартах и рекомендациях на проектирование металлоконструкций представлены типовые сварные соединения с непроварами, однако влияние геометрических параметров соединения на долговечность в них не рассматривается.

Цель работы – разработка методики расчета долговечности и трещиностойкости сварных элементов металлоконструкций подъемно-транспортных и строительных машин, имеющих конструктивные и технологические непровары. Методика должна учитывать характер нагружения узла и два возможных варианта образования непровара. Острый непровар, когда расстояние между свариваемыми листами, образующими непровар, настолько мало, что его можно считать готовой трещиной, а для описания напряженно-деформированного состояния (НДС) при развитии трещины использовать коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) и критерии механики разрушения. И притупленный непровар, когда НДС в вершине непровара описывается коэффициентами концентрации и градиентами напряжений и деформаций, а значительный период долговечности составляет накопление усталостных повреждений и период формирования макротрещины.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

- исследовать НДС в вершине острого непровара, определить зависимости изменения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от длины трещины и геометрических параметров сварного соединения, траекторию роста трещины и время ее развития при усталостном разрушении;
- исследовать НДС в вершине притупленного непровара, получить зависимости для расчетной оценки размеров зоны предразрушения, коэффициентов концентрации, градиентов напряжений и деформаций от геометрических параметров соединения и уровня нагружения;
- разработать с учетом полученных зависимостей методику оценки долговечности соединений с конструктивно-технологическими непроварами в диапазоне геометрических параметров и вариантов нагружения, характерных для металлоконструкций подъемно-транспортных и строительных машин;
- провести экспериментальные исследования для апробации разработанной методики.

Для инженерного использования предлагаемая методика расчета долговечности сварных соединений с острыми и притупленными конструктивно-технологическими непроварами реализована как часть программного комплекса расчета долговечности сварных элементов грузоподъемных и строительных машин.

Метод исследования. В работе использованы методы планирования численного эксперимента, регрессионного анализа, исследования напряженно-деформированного состояния в среде конечно-элементного моделирования ANSYS, методы экспериментального исследования долговечности и трещиностойкости на испытательном комплексе INSTRON 8806.

Достоверность результатов численного моделирования и расчетных моделей подтверждена результатами экспериментальных исследований, сопоставлением результатов расчетов с известными данными.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенная методика и полученные зависимости позволяют проводить оценку долговечности металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин с непроварами в сварных элементах, оценивать остаточный ресурс в период эксплуатации. Полученные зависимости и модели могут быть полезны при расследовании причин аварий конструкции грузоподъемных и строительных машин вызванных усталостными разрушениями. Результаты работы могут быть использованы и в других отраслях промышленности, таких как судостроение, автомобилестроение.

Апробация работы. Основные материалы диссертации доложены и положительно оценены на международных научно-практических конференциях «Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Охрана окружающей среды. Международная научно-практическая конференция» (Пермь, 2010), «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Пермь, 2012), «XXXIX Неделя науки СПбГПУ» (СПб, 2010), «XL Неделя науки СПбГПУ» (СПб, 2011), на II Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (СПб, 2012), на

семинарах кафедры «Транспортные и технологические системы» СПбГПУ (СПб, 2010-2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ (из них 3 работы в журналах Перечня ВАК).

На защиту выносятся следующие результаты, полученные лично автором и обладающие научной новизной:

- Методика расчета долговечности сварных соединений грузоподъемных и строительных машин с конструктивными непроварами.
- Расчетные зависимости для оценки коэффициентов интенсивности напряжений в вершине острого непровара.
- Расчетные зависимости для оценки коэффициентов концентрации и градиентов напряжений и деформаций в упругой и упругопластической областях деформирования в вершине притупленного непровара.
- Результаты моделирования траекторий и определения скоростей развития трещин, результаты анализа влияния геометрических параметров сварных соединений с непроварами на долговечность элементов конструкции грузоподъемных и строительных машин.
- Результаты экспериментального исследования соединений с конструктивными непроварами.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 90 наименований. Работа изложена на 176 страницах машинописного текста, включая 115 иллюстраций, 34 таблицы и 1 приложение.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, представлена структурная схема диссертационной работы.

В **главе 1** рассмотрены существующие металлоконструкции грузоподъемных и строительных машин, имеющие конструктивно-технологические непровары в сварных соединениях, Приведены примеры и статистика усталост-

ных разрушений и проанализированы места образования усталостных трещин в сварных соединениях металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин.

Вопросам сопротивления усталости сварных металлоконструкций посвящены отечественные исследования М.М.Гохберга, И.В.Кудрявцева, В.Н.Юшкевича, Н.А.Клыкова, С.А.Соколова, С.В.Петина, К.П.Манжулы, А.В.Ильина и др. и зарубежные исследования В.И.Труфякова, S.Maddox, T.Gurney, D.Radaj, C.Sonsino, W.Fricke, G.Marquis и др. Однако в этих исследованиях развитие усталостного разрушения от непровара почти не рассматривается.

В отечественной нормативной методике расчета металлоконструкций грузоподъемных машин, основанной на обобщении многочисленных усталостных испытаний различных типов соединений определяются основные расчетные параметры: эффективный коэффициент концентрации K , предел выносливости сварного соединения σ_{Rk} и показатель m уравнения Велера. При этом характеристики усталости соединения не зависят от места разрушения (зона сопряжения шва с основным металлом или непровар), методика не отражает особенностей конструктивно-технологического исполнения соединений, что приводит к ошибкам в определении пределов выносливости.

В европейских стандартах (EN) сопротивление усталости для номинального размаха напряжений определяется при помощи кривых усталости (S-N), которые составлены для типовых групп элементов конструкций. В рекомендациях международного института сварки (IIW) крестовые сварные соединения с непроварами при растяжении приваренного листа относятся к классам FAT36 при разрушении от непровара и FAT63 от радиусного перехода. В американском стандарте ANSI AWS D1.1/D1.1M:2004 также рассматриваются угловые по форме сварные соединения с непроварами при растяжении приваренных листов. Однако в стандартах не учитываются геометрические особенности соединений с непроваром, а также рассматривается только растяжение нормальное к непровару.

Стандартами на сварку толщина конструктивно-технологических непроваров варьируется, как правило, от 0 до 2-х мм. При толщине более 0,5 мм непровар на концах имеет закругления, в районе которых при действии нагрузки возникает напряженно-деформированное состояние, которое может быть оценено с помощью коэффициентов концентрации и градиентов напряжений и деформаций. В случае, когда зазор менее 0,5 мм непровар, называемый острым, можно рассматривать как готовую трещину и оценивать НДС в вершине непровара через параметры механики разрушения (рис.1).

Методика оценки металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин с непроварами в сварных соединениях основана на разделении непроваров на острые и притупленные. Для расчета долговечности предложены две математические модели.

В случае острого непровара рассматривается рост и траектория движения макротрещины под действием внешней циклической нагрузки и сварочных напряжений,

При притупленном непроваре развивается четырехстадийная модель усталостного повреждения и разрушения сварных соединений, предложенная в работах К.П.Манжулы. В модели описываются процессы деформирования и накопления повреждений, инициации трещин от непровара, учитываются параметры конструктивно-технологического исполнения соединения, а также особенности нагружения металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин.

Глава 2 посвящена исследованию НДС в вершине острого непровара.

В качестве характеристик, определяющих напряженно-деформированное состояние в вершине острого непровара в работе используются коэффициенты интенсивности напряжений, которые являются функцией от геометрических

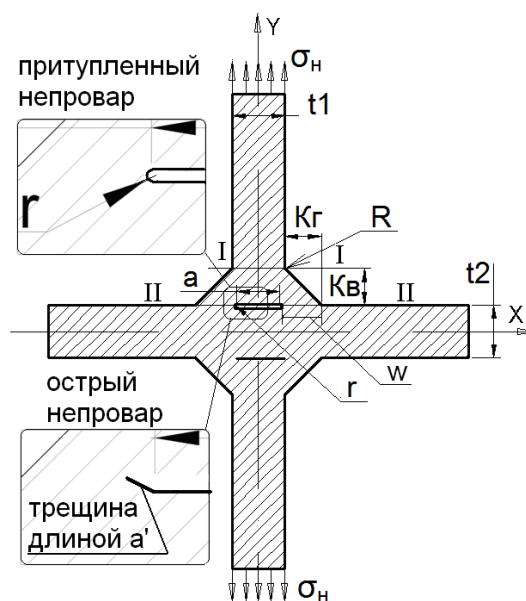


Рис. 1. Расчетная модель крестового соединения при растяжении

характеристик сварного соединения, уровня нагружения, длины трещины. Рассматриваются несколько расчетных случаев нагружения элементов металлоконструкций подъемно-транспортных и строительных машин: растяжение крестообразных соединений по разрезному элементу, нагружение поперечной силой тавровых соединений, комбинированное нагружение тавровых соединений. В главе описывается построение расчетных моделей острого непровара в среде конечно-элементного моделирования Ansys в плоской и объемной постановке. Представлена методика моделирования трещины с использованием сингулярных элементов.

Геометрия сварного шва описывается 5...10 параметрами. Были выделены наиболее характерные для конструкций грузоподъемных и строительных машин геометрические параметры сварных соединений, и диапазоны их варьирования, составившие матрицу планирования расчетного эксперимента. По методике планирования многофакторного эксперимента был составлен план, предусматривающий проведение серии из 32 опытов, с пошаговым моделированием продвижения трещины в каждом опыте. В результате обработки данных моделирования была получена упрощенная зависимость для коэффициента интенсивности напряжений

$$K_I = 0.01\Delta\sigma \cdot \left[\begin{aligned} & b_0 - 2.33(b_1 + b_2 + b_3) - 4b_3 - 1.67b_4 + 3.33b_1 \frac{K_B}{t_1} + 3.33b_2 \frac{a}{t_1} + 5b_3 \frac{K_B}{K_B} + 0.067b_4 t_2 + \\ & + 3.33b_5 \frac{t_1}{t_2} + b_{12} \left(3.33 \frac{K_B}{t_1} - 2.33 \right) \left(3.33 \frac{a}{t_1} - 2.33 \right) + b_{14} \left(3.33 \frac{K_B}{t_1} - 2.33 \right) (0.067t_2 - 1.67) + \\ & + b_{15} \left(3.33 \frac{K_B}{t_1} - 2.33 \right) \left(3.33 \frac{t_1}{t_2} - 2.33 \right) + b_{24} \left(3.33 \frac{a}{t_1} - 2.33 \right) (0.067t_2 - 1.67) + b_{25} \left(3.33 \frac{a}{t_1} - 2.33 \right) \left(3.33 \frac{t_1}{t_2} - 2.33 \right) + \\ & + b_{45} (0.067t_2 - 1.67) \left(3.33 \frac{t_1}{t_2} - 2.33 \right) + b_{124} \left(3.33 \frac{K_B}{t_1} - 2.33 \right) \left(3.33 \frac{a}{t_1} - 2.33 \right) (0.067t_2 - 1.67) + \\ & + b_{125} \left(3.33 \frac{K_B}{t_1} - 2.33 \right) \left(3.33 \frac{a}{t_1} - 2.33 \right) \left(3.33 \frac{t_1}{t_2} - 2.33 \right) + b_{245} \left(3.33 \frac{a}{t_1} - 2.33 \right) (0.067t_2 - 1.67) \left(3.33 \frac{t_1}{t_2} - 2.33 \right) \end{aligned} \right] \quad (1)$$

Здесь обозначения соответствуют рис.1, коэффициенты уравнения представляют собой полиномы от относительной величины приращения трещины и в общем виде записываются как

$$b_p = \beta_{0p} + \beta_{1p} \cdot \left(\frac{a'}{w} \right) + \beta_{2p} \cdot \left(\frac{a'}{w} \right)^2 + \beta_{3p} \cdot \left(\frac{a'}{w} \right)^3 + \beta_{4p} \cdot \left(\frac{a'}{w} \right)^4, \quad (2)$$

где β_{qp} ($q=0,1,\dots,4$) – коэффициент перед соответствующей степенью множителя (a'/w), определяемый по таблице 1, $p=0,1,2,\dots,5,12,\dots,12345$ – индекс, указывающий на соответствующий параметр или группу параметров, (a'/w) – относительный размер трещины от вершины непровара. Размерность K_I в $\text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, σ – МПа, t_2 – мм, остальные параметры берутся как относительные.

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнения (2)

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
b0	10,89	11,06	54,03	-136,15	155,96	b15	-0,63	1,27	-14,28	38,71	-31,89
b1	-2,56	-0,04	-9,67	17,76	-25,59	b24	1,13	-0,26	1,36	0,61	-2,91
b2	3,40	-0,98	8,15	-15,28	18,22	b25	0,67	0,59	-3,28	7,70	0,32
b3	-0,33	1,79	6,76	-24,03	37,66	b45	0,90	2,05	-4,90	15,58	-14,66
b4	3,62	4,91	8,22	-21,15	34,29	b124	-0,45	-1,41	7,71	-19,44	16,34
b5	2,69	1,89	25,74	-64,90	56,18	b125	-0,31	-0,18	0,01	0,05	-5,75
b12	-1,37	-1,46	2,91	-6,26	1,97	b245	0,516	0,628	3,246	-8,634	9,554
b14	-0,86	-0,12	-3,90	8,41	-12,95						

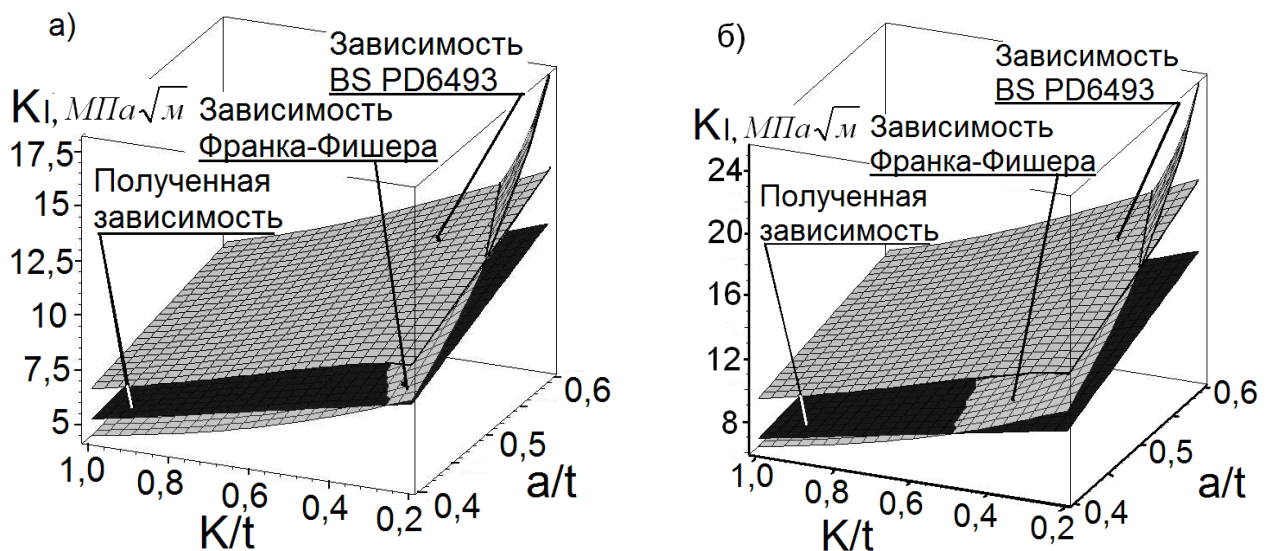


Рис. 2. Графики зависимости K_I от K/t и a/t при $\sigma = 100$ МПа, $t=t_1=t_2$, $K=K_B=K_\Gamma$: а) - $t=10$ мм, б) - $t=20$ мм

Сравнение полученного уравнения с зависимостью Франка – Фишера показывает хорошую сходимость, однако в области низких значений катета шва и высоких значений исходного непровара зависимость начинает стремительно возрастать (рис.2). Стандарт BS PD6493 дает несколько завышенные результаты. Наиболее существенное влияние на значения КИН оказывают размер начального непровара и катета шва. Меньшее влияние оказывает параметр формы шва (в рассмотренном диапазоне).

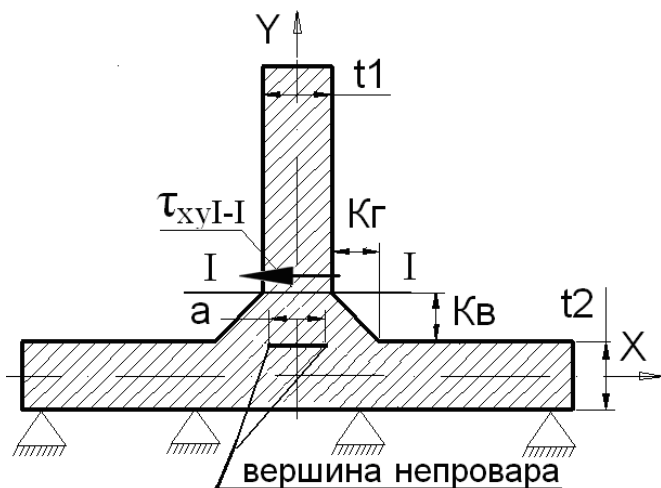


Рис. 3. Расчетная модель таврового соединения, нагруженного поперечной силой

Оценка КИН при действии поперечной нагрузки проводилась в двух случаях нагружения: при действии только перерезывающей силы в сечении I-I (рис.3) и при нагружении силой на консоли, действующей вдоль фланговых швов. НДС в вершине острого непровара и трещины определяется действием КИН от растяжения K_I и сдвига K_{II} . В этом случае

определяется эквивалентный КИН $K_{eq} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$.

При действии только перерезывающей силы был составлен план численного эксперимента, предусматривающий серию из 15 опытов. В результате обработки, при $\tau_{xyI-I}=100$ МПа, получено уравнение для K_{eq} , описывающее развитие трещины в зависимости от геометрии соединения

$$K_{eq} = c_0 + \frac{K_2}{t_1} c_k + \frac{a}{t_1} c_a + t_1 c_t + \left(\frac{K_2}{t_1}\right)^2 c_{k2} + \left(\frac{a}{t_1}\right)^2 c_{a2} + (t_1)^2 c_{t2} + \frac{K_2}{t_1} \frac{a}{t_1} c_{ka} + \frac{K_2}{t_1} t_1 c_{kt} + \frac{a}{t_1} t_1 c_{at}, \quad (3)$$

где c_m – коэффициент перед слагаемым при $m=0, \dots, at$, определяется по уравнению (4) и таблице 2, параметры геометрии соединения по рис.3

$$c_m = \beta'_{0m} + \beta'_{1m} \cdot \left(\frac{a'}{w}\right) + \beta'_{2m} \cdot \left(\frac{a'}{w}\right)^2 + \beta'_{3m} \cdot \left(\frac{a'}{w}\right)^3 + \beta'_{4m} \cdot \left(\frac{a'}{w}\right)^4. \quad (4)$$

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения (4)

c_m	β'_0	β'_1	β'_2	β'_3	β'_4
c_0	5,537	-61,617	455,32	-1079,41	861,75
c_k	-11,59	40,245	-433,350	1225,833	-1047,666
c_a	3,885	154,898	-841,457	1706,238	-1234,795
c_t	0,213	2,181	-13,333	30,776	-22,184
c_{k2}	8,326	6,432	185,519	-636,065	559,884
c_{a2}	1,939	-40,475	367,6	-860,839	651,257
c_{t2}	-0,00041	-0,01683	0,13149	-0,3209	0,24651
c_{ka}	-5,42	-101,908	336,662	-539,48	369,707
c_{kt}	-0,216	-1,764	9,62	-19,878	13,605
c_{at}	0,196	1,097	-5,229	10,296	-6,926

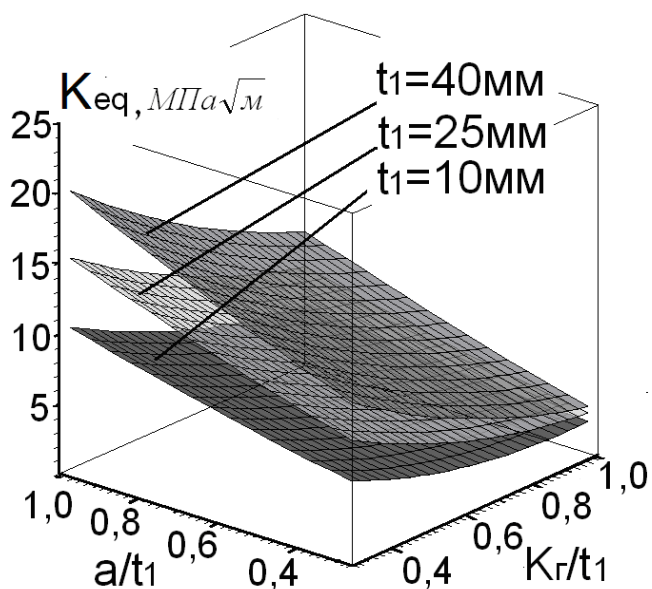


Рис. 4. Зависимости K_{eq} от рассматриваемых геометрических параметров при нагружения исходного непровара нагрузкой $\tau_{xyI-I}=100$ МПа

Эквивалентные КИН возрастают с увеличением толщины притыкуемого элемента. Длина исходного непровара оказывает большее влияние на рост K_{eq} и долговечность, чем уменьшение размера горизонтального катета шва (рис.4).

При приложении поперечной силы на консоли привариваемого элемента в главе описана методика моделирования фланговых швов с использованием балочных элементов.

Получены зависимости для K_{eq} при различных катетах швов. Для проверки корректности построения плоской модели была создана объемная модель. Описана методика объемного моделирования острого непровара. Значения КИН, полученные по результатам решений на плоских имитационных моделях, показали завышенные (менее 20%) результаты в сравнении с решениями, получаемыми на объемных моделях, что идет в запас прочности при расчетах долговечности.

В главе проведен расчет КИН в объемной модели острого непровара для проушины крепления гидроцилиндра рукояти экскаватора, нагруженной поперечной и растягивающей силами.

В главе 3 исследуется НДС в вершине притупленного непровара. В оптимально спроектированных конструкциях грузоподъемных и строительных машин во время нагружения металл в вершине притупленного непровара может находиться в двух состояниях: упругом или упругопластическом. Количественно НДС в вершине непровара определяется в упругой области теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_σ и относительным градиентом напряжений \bar{G}_σ , а в упругопластической области - коэффициентом концентрации

деформаций K_ε и относительным градиентом деформаций \bar{G}_ε . По значениям характеристик α_σ , \bar{G}_σ , K_ε , \bar{G}_ε определяются опасные по усталостному повреждению объемы металла в вершине непровара.

Для построения расчетных зависимостей были выделены наиболее значимые параметры геометрии с диапазоном варьирования, наиболее характерным для металлоконструкций подъемно-транспортных и строительных машин (табл. 3, обозначения по рис.1). Было построено 24 расчетные модели для упругой и 24 для упругопластической области деформирования вершины непровара при варьировании нагружения. Было решено 192 задачи.

Таблица 3

Рассматриваемые значения параметров	
Параметр	Рассматриваемое значение
Катет вертикальный K_v , мм	7; 10; 15; 40
Форма шва K_v/K_Γ	0,7; 1,0; 1,4
Толщина непровара $d=2r$, мм	0,5; 1; 1,5; 2
Толщина листа $t=t_1=t_2$, мм	10; 20; 40
Относительный размер непровара a/t	0,4; 0,7; 1,0
Номинальное напряжение σ_n , МПа	150; 200; 250; 300

Абсолютные градиенты G_σ и G_ε характеризуют скорость убывания напряжений $G_\sigma = \frac{\sigma_{\max} - u}{a'_B} = \text{tg} \theta_2$ и деформаций $G_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{0.2}}{a'_A} = \text{tg} \theta_1$,

рис.5. Для того чтобы градиент зависел только от геометрических характеристик концентратора его приводят к относительному виду $\bar{G}_\sigma = \frac{G_\sigma}{\sigma_{\max}}$ и $\bar{G}_\varepsilon = \frac{G_\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}$. Здесь u –

нижний порог опасного по усталостному повреждению напряжения.

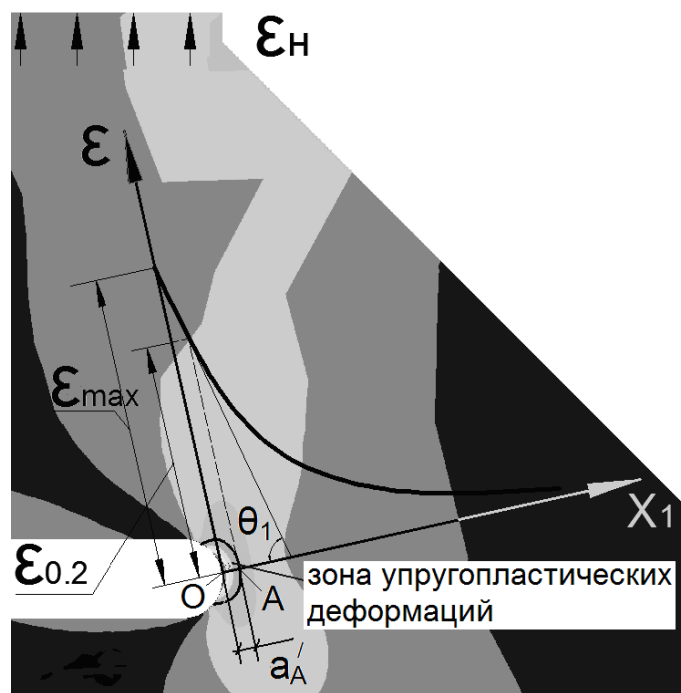


Рис. 5. Схема к определению градиентов деформаций (показано на нагруженной модели, распределение деформаций по Мизесу)

Инженерная зависимость для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений получена в виде

$$\alpha_{\sigma} = 9,19 + r \cdot (-9,19 + 0,91K_B - 0,92K_r + 5r) + 0,02K_B \cdot \left(-33,04 - 12,21 \frac{a}{t} + 0,304t\right) + \frac{a}{t} \cdot (2,43 + 0,42t) + 0,02K_r \cdot \left(47,41 - 7,78 \frac{a}{t} + 1,72t - 2,21K_r\right) + 0,01t \cdot (-75,04 + 1,44t) \quad (5)$$

Аналогичная зависимость для определения относительного градиента напряжений имеет вид

$$\bar{G}_{\sigma} = r \cdot \left(-1,553 - 0,587K_B + 0,658K_r - 0,962 \frac{a}{t} - 0,047t + 0,009\sigma_H\right) + 0,004\sigma_H \cdot (-12,267 + 0,0138\sigma_H) + 0,02K_B \cdot \left(-4,687 - 1,622t + 2,347K_B + 0,026 \frac{a}{t} - 0,024\sigma_H\right) + 0,01t \cdot (193,605 + 0,0807\sigma_H - 4,187t) + 0,02K_r \cdot (-31,69 - 2,77t + 2,91K_r - 0,0077\sigma_H) + \frac{a}{t} \cdot \left(-4 + 0,615 \frac{a}{t} + 0,0142\sigma_H\right) - 1,064 \quad (6)$$

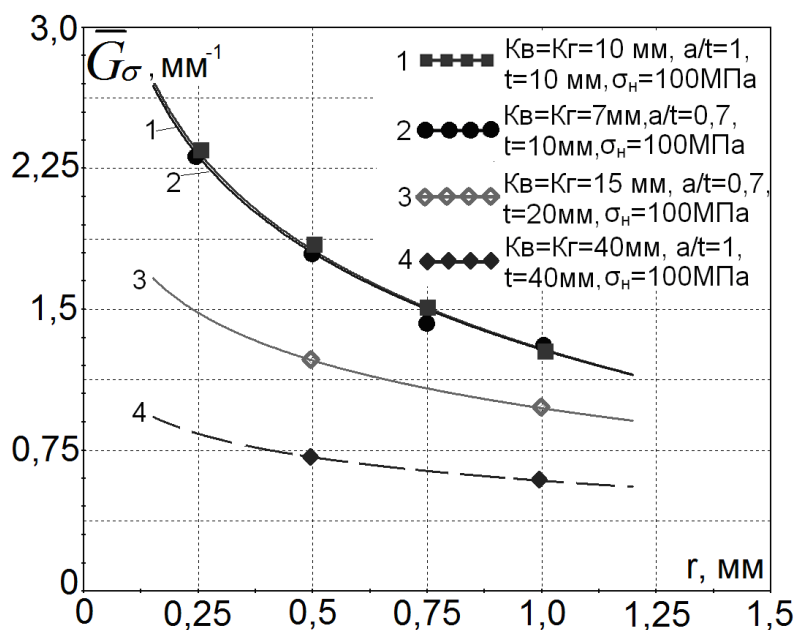


Рис. 6. Влияние радиуса вершины непровара на значение относительного градиента напряжений в крестовом сварном соединении при растяжении

Анализ зависимости (5) показал, что наибольшее влияние на коэффициент концентрации напряжений оказывает радиус вершины непровара. Также длина непровара существенно повышает концентрацию напряжений в вершине, причем при меньших значениях размера катета шва увеличение длины не-

провара более интенсивно увеличивает концентрацию. Катеты шва в рассмотренном диапазоне несущественно влияют на коэффициент концентрации напряжений в непроваре, при этом наименьшее значение концентрации получается при одинаковых катетах шва. Уменьшение радиуса вершины непровара увеличивает значение относительного градиента напряжений более интенсивно при малых толщинах свариваемых листов и катетов шва (рис.6).

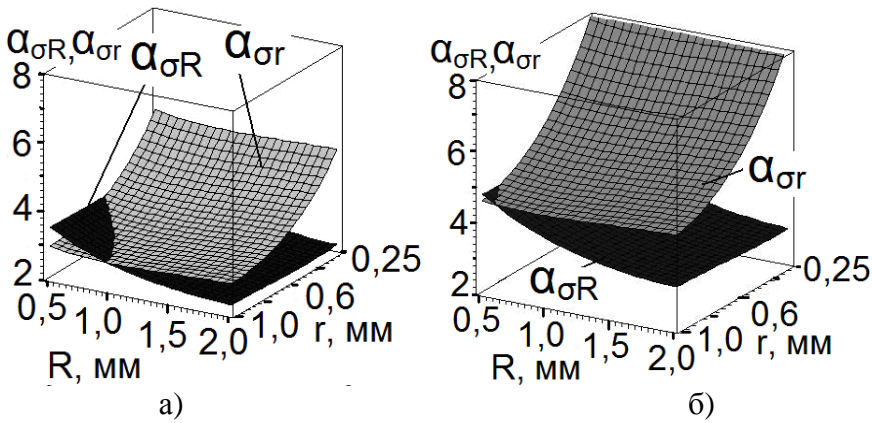


Рис. 7. Коэффициенты концентрации напряжений в вершине непровара α_{σ} и в радиусном переходе $\alpha_{\sigma R}$ таврового сварного соединения при $t=t_1=t_2=10\text{ мм}$ $K_r=K_B=7\text{ мм}$ при растяжении по приваренному элементу а) – $a/t=0,4$, б) – $a/t=1,0$ (обозначения по рис.1)

В главе на основе моделирования показано, что при радиусах вершины непровара r менее 0,5-0,8 мм и радиусном переходе R более 1,0 мм наибольшая концентрация напряжений оказывается в

вершине непровара (рис.7). В этих случаях трещина зарождается в вершине непровара, а не в зоне радиуса сопряжения шва с основным металлом.

Для коэффициентов концентрации деформаций получена зависимость

$$\begin{aligned}
 K_\epsilon = & r \left(-26,76 + 6,48K_B - 8,07K_r + 20 \frac{a}{t} + 1,14t - 32,75 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} + 15,64r \right) + \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \left(-102,13 + 55,45 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \right) + \\
 & + 0,02K_B \left(-320,56 - 1,95t + 15,41K_B - 6,88K_r - 52 \frac{a}{t} - 273,8 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \right) + 0,01t \left(795,9 + 700,69 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} - 26,07t \right) + \\
 & + 0,02K_r \left(350,57 - 252,04 \frac{a}{t} - 30,39t + 30K_r - 59,9 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \right) + \frac{a}{t} \left(-68,28 + 4,91t + 24,23 \frac{a}{t} + 71,6 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \right) \quad (7)
 \end{aligned}$$

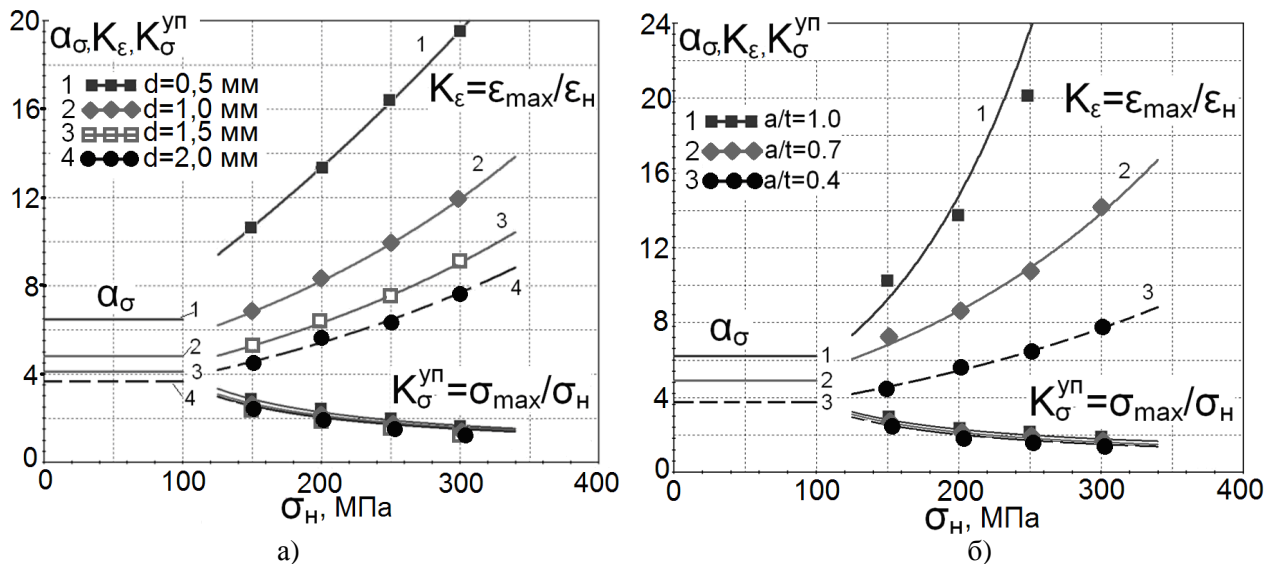


Рис. 8. Влияние толщины непровара d на значения коэффициентов концентрации α_σ , K_ϵ , $K_\sigma^{уп}$ в крестовом сварном соединении при растяжении $a/t=1,0$, $t=10\text{ мм}$ $K_r=K_B=10\text{ мм}$ - а), влияние относительной длины непровара a/t на значения коэффициентов концентрации α_σ , K_ϵ , $K_\sigma^{уп}$ в крестовом сварном соединении при растяжении – $r=0,5\text{ мм}$, $t=10\text{ мм}$ $K_r=K_B=7\text{ мм}$ - б)

Коэффициент концентрации упругопластических деформаций K_ε значительно возрастает при уменьшении радиуса вершины непровара, уровня нагружения и увеличении длины непровара (рис.8). Коэффициент концентрации упругопластических напряжений $K_\sigma^{уп}$, в вершине непровара, с ростом уровня нагружения уменьшается и поэтому не является информативным параметром при разрушении.

Зависимость для определения относительного градиента упругопластических деформаций получена в виде

$$\begin{aligned} \bar{G}_\varepsilon = & 16,65 + 0,02K_B \left(91,53 - 13,29 \frac{a}{t} + 1,12t - 15,37 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} - 2,63K_B + 0,33K_r \right) - 10,99 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \\ & + r \left(-3,14 - 1,2K_B + 1,22K_r + 2,81 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} \right) + 0,02K_r \left(-48,34 + 9,74 \frac{a}{t} - 0,33t + 0,49K_r \right) + \quad (8) \\ & + \frac{a}{t} \left(-8,4 + 0,13t + 5,48 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} + 1,73 \frac{a}{t} \right) + 0,01t \left(-151,06 + 35,38 \frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}} + 3,06t \right). \end{aligned}$$

Уменьшение радиуса r вершины непровара увеличивает значение относительного градиента \bar{G}_ε более интенсивно при малых размерах катетов шва, поверхность 2, (рис.9).

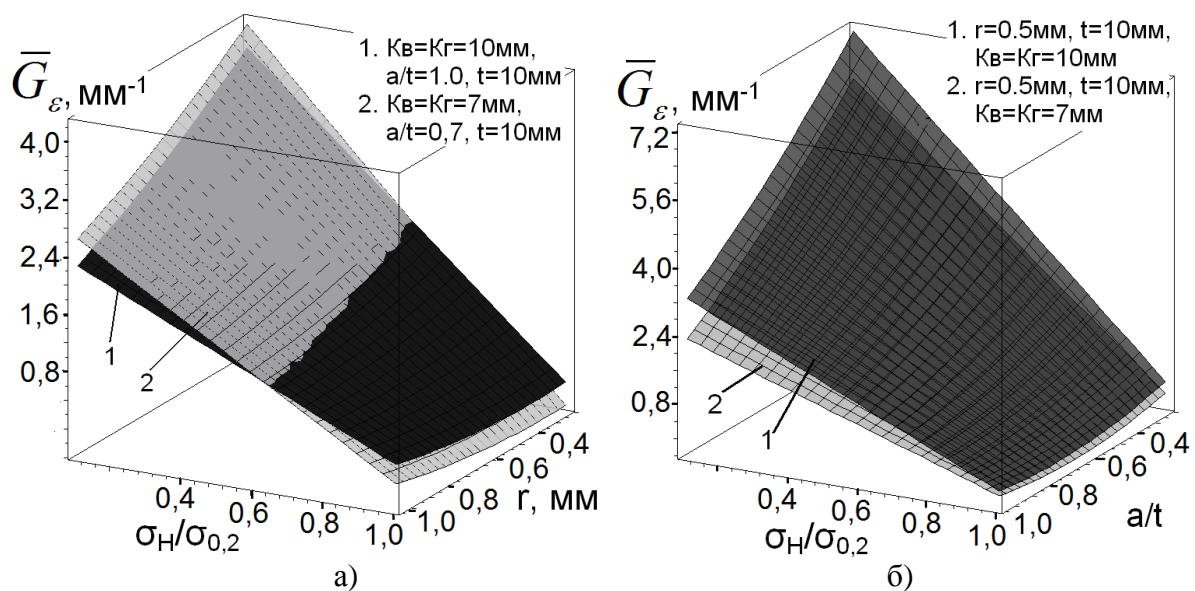


Рис. 9. Влияние радиуса вершины непровара и уровня нагружения на относительный градиент деформаций - а), влияние длины непровара и уровня нагружения на относительный градиент деформаций - б)

Для учета масштабного эффекта в усталости при переходе от лабораторных образцов к реальным конструкциям необходимо располагать зависимостями, определяющими объемы металла (зоны предразрушения), в которых ини-

цируются усталостные трещины. Металл в вершине непровара при растяжении может находиться в упругом $\sigma_{0,2} > \sigma_{max} > u$ или упругопластическом $\varepsilon_{max} > \varepsilon_{0,2}$ состоянии в зависимости от уровня номинального напряжения. При наличии пластической зоны в вершине непровара в прилегающей к ней упругой зоне $\sigma_{max} > u$ так же накапливаются повреждения. В работе получены уравнения для определения этих объемов. Так, зависимость расчета объема зоны пластической деформации в вершине непровара имеет вид

$$V_\varepsilon = L \left[r \left(33,99 + 5,38K_B - 1,287K_\Gamma - 41,49 \frac{a}{t} - 3,256t - 0,0043\sigma_H \right) + 0,05t \cdot (620,74 + 0,14883\sigma_H - 20,61t) + \right. \\ \left. + 0,05K_B \cdot \left(-31,81 - 0,073K_\Gamma - 9,97 \frac{a}{t} - 0,347t - 0,083\sigma_H + 0,074K_B \right) + 0,004\sigma_H \cdot (-31,96 + 0,0506\sigma_H) + \right. \\ \left. + 0,05K_\Gamma \cdot \left(20,86 - 4,44 \frac{a}{t} - 0,072t - 0,0194\sigma_H \right) + \frac{a}{t} \cdot \left(8,65 + 0,913t + 1,92 \frac{a}{t} + 0,0414\sigma_H \right) - 207,47 \right] \quad (9)$$

где L – длина шва; остальные параметры соответствуют расчетной схеме, представленной на рис. 1.

В главе 4 представлена реализация методики оценки долговечности и трещиностойкости сварных конструкций с острыми и притупленными непроварами, приведены результаты экспериментальных исследований, даны примеры расчета долговечности элементов сварных металлоконструкций грузоподъемных машин с непроварами.

Расчет долговечности и трещиностойкости сварных соединений с конструктивными непроварами проводился для двух случаев: от острого непровара, представляемого готовой трещиной и от притупленного непровара. В первом случае определялась траектория, скорость роста трещины и количество циклов от начального размера трещиноподобного непровара до критического размера трещины в зависимости от уровня КИН. Во втором случае расчет базировался на стадийной модели усталостного разрушения, рассматривающей процессы упругопластического и неупругого деформирования металла в вершине непровара, рассеянного накопления повреждений, условия зарождения усталостных микротрещин, формирование и развитие макротрещины. Реализацией второго случая является дополнение программного комплекса D_UST расчета усталост-

стой долговечности металлоконструкций грузоподъемных машин зависимостями для оценки концентрации напряжений и деформаций, а также «опасных»

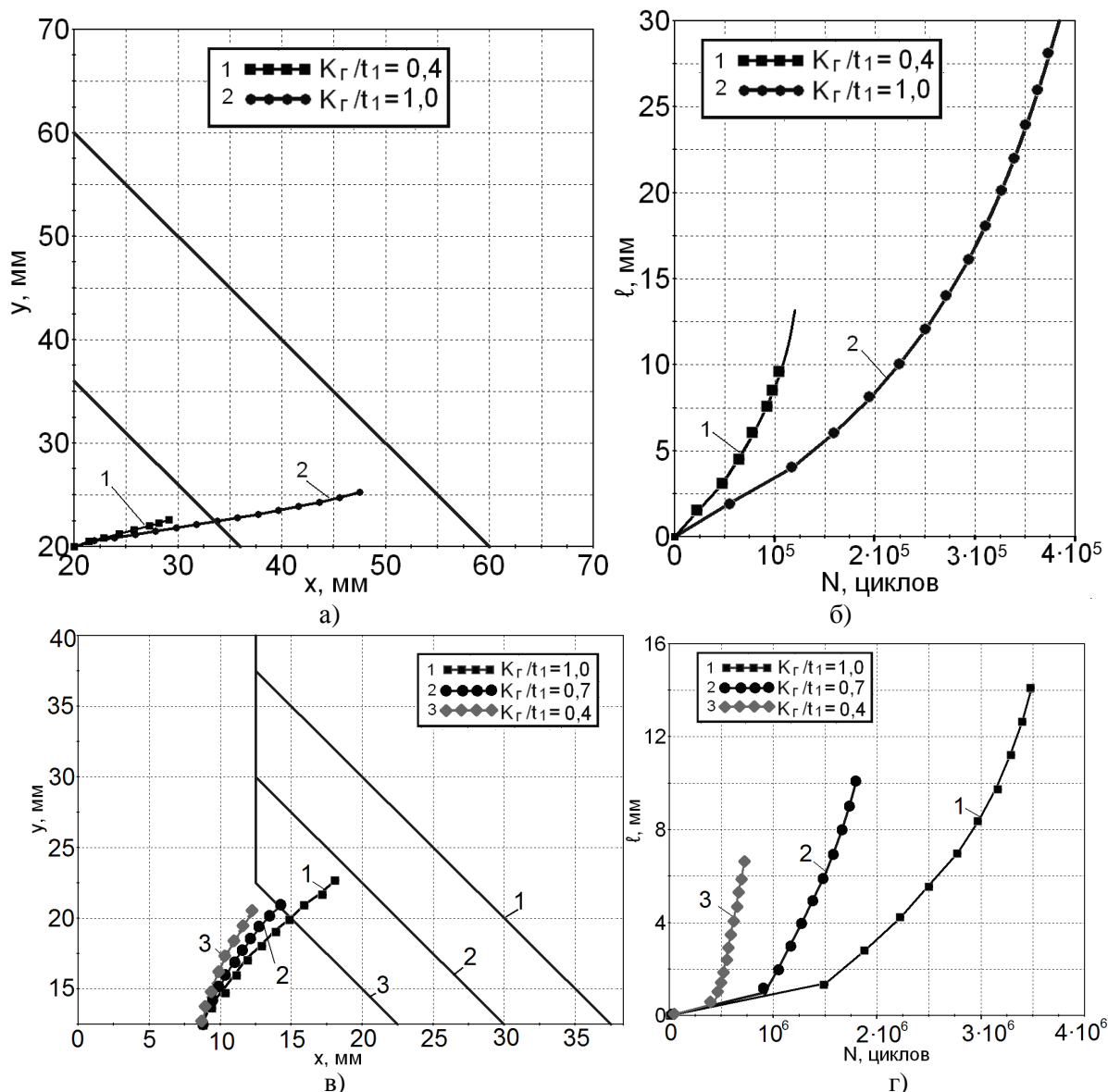


Рис. 10. Траектории трещины – а), в); зависимость длины трещины от количества циклов – б), г); в модели при действии растягивающей - а), б) и поперечной нагрузки - в), г)

объемов металла в вершине непровара, полученными во второй и третьей главах данной работы.

Для получения сравнительных характеристик и оценки влияния геометрии соединения на скорость роста трещины в крестообразных образцах использовалось интегрирование уравнения Формана

$$N_i = \int_{l_f}^{l_i} \frac{1-R}{C(\Delta K(l))^n} dl, \text{ где } C \text{ и } n \text{ – параметры материала, } i \text{ – шаг, отмечающий рост трещины от начального разме-}$$

ра.

ра l_F до размера l_i . Размах КИН определялся по полученным ранее зависимостям. Сварочные остаточные напряжения в образцах практически нет.

Были построены серии графиков траектории, и зависимости длины трещины от количества циклов, которые могут быть использованы для оценки остаточного ресурса сварных элементов грузоподъемных и строительных машин. Пример таких графиков представлен на рис.10.

В экспериментальных исследованиях определялась траектория развития трещины от непровара и долговечность соединения. В ходе испытаний наблюдаемый рост трещины оценивался фиксированием траектории за определенное количество циклов. Образец был изготовлен из листа 40мм стали 09Г2С, сварка проводилась полуавтоматом

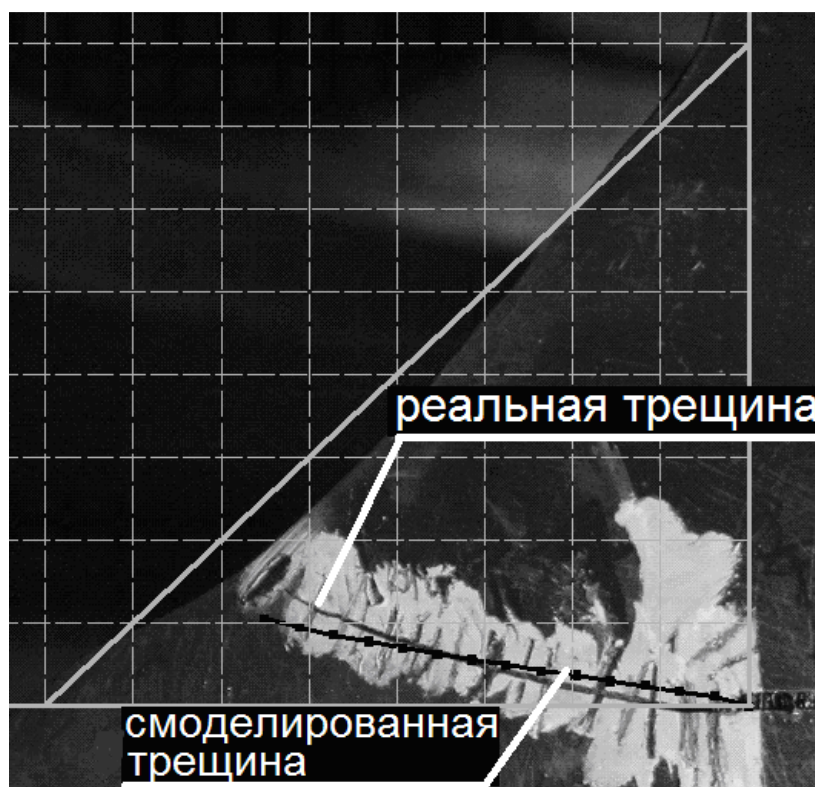
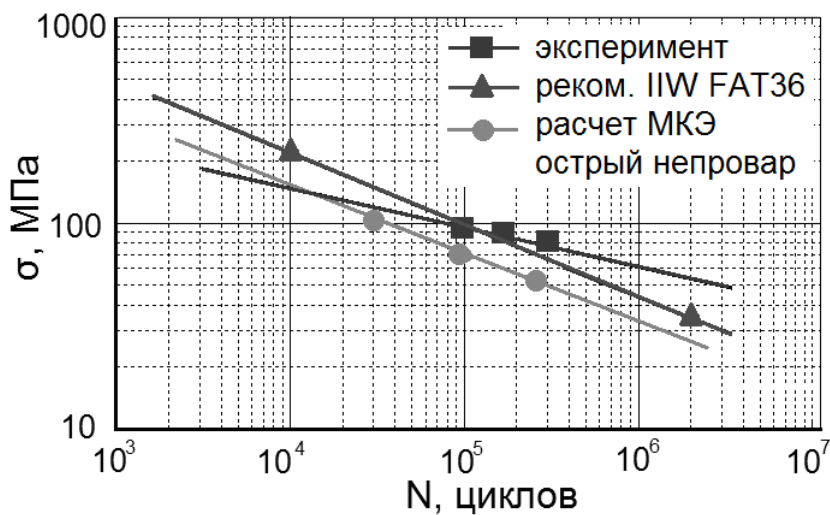


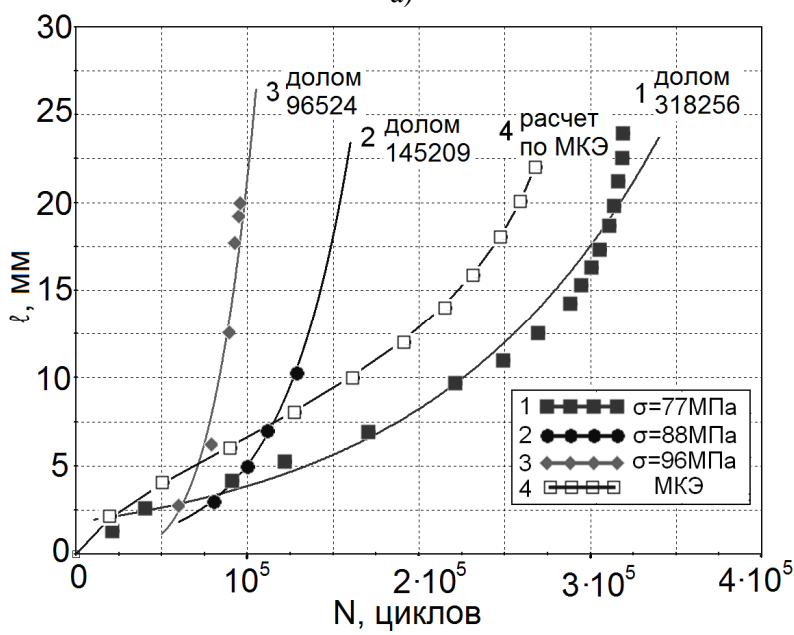
Рис.11. Сравнение смоделированной и реальной трещины

в среде защитных газов (80% аргон, 20% углекислота) сварочной проволокой 08Г2С.

Сравнение траекторий трещин полученных в эксперименте и моделируемых в МКЭ показало близкий результат, (рис.11). Так, наблюдаемые расхождения траекторий ведущих и моделируемых трещин не превышали 9° , у вторичных трещин 2° . Стоит отметить, что при моделировании, проводимом во второй главе данной работы, не производилось разделение на ведущую и вторичную трещину от непровара, модель считалась симметричной.



а)



б)

Рис. 12. Кривые усталости – а) и зависимости длины трещины от числа циклов – б) по результатам моделирования и эксперимента (линия 4 при $\sigma=70$ МПа, $C=4,75 \cdot 10^{-12}$ МПа·м^{0,5}, $n=3$)

С использованием программного комплекса D_UST приведен пример расчета узла металлоконструкции главной балки ковочного крана, имеющем непровар в сварном шве приварки центральной диафрагмы к стенке. Моделировались типовые технологические циклы работы крана. Проводился также расчет для острого непровара. Показано, что острый непровар по сравнению с притупленным снижает долговечность узла примерно в 2 раза. Также приведен расчет проушины с непроваром в тяге крепления стационарного башенного крана,

разрушение которой имело место на практике. Расчет узла без непровара показал неограниченную долговечность. При наличии непровара длиной от 5 до 10 мм в сварном соединении долговечность узла снижается от полутора до трех раз

Заключение и основные выводы

В настоящем диссертационном исследовании разработан ряд методических материалов, позволяющих применять математическую модель усталостно-

го повреждения для расчета сварных соединений с конструктивно-технологическими непроварами. Полученные материалы являются новым научным результатом и направлены на повышения надежности прогнозирования долговечности и остаточного ресурса металлических конструкций подъемно-транспортных и строительных машин.

Основные выводы и результаты диссертационной работы сводятся к следующему.

1. Разработана методика оценки долговечности и трещиностойкости сварных металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин, имеющих непровары в сварных соединениях, которая позволяет учитывать различные параметры конструктивно-технологического исполнения соединений и закономерности напряженно-деформированного состояния в вершине непровара.

2. Проведены расчетно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния в вершине острого (трещиноподобного) непровара. Получены расчетные зависимости коэффициентов интенсивности напряжений в вершине острого непровара от длины исходной и растущей трещины, от влияния геометрических параметров соединения, в диапазоне характерном для металлоконструкций грузоподъемных и строительных машин при различных условиях нагружения. Проведенные исследования показали, значительное влияние на уровень НДС в вершине трещины от непровара катета шва и слабое влияние формы шва.

3. Разработана методика объемного моделирования трещиноподобного непровара и определения КИН по фронту трещины. Значения КИН, получаемые по результатам решения на плоских имитационных моделях, дают завышение не более 20% в сравнении с решениями, получаемыми на объемных моделях, что идет в запас прочности при расчетах долговечности.

4. Проведены расчетно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния в вершине притупленного непровара. Анализ литературных источников выявил ограниченное число зависимостей для определения теоретических коэффициентов концентрации напряжений и отсутствие

зависимостей для оценки градиентов и коэффициентов концентрации деформаций и напряжений в упругопластической области. Получены уравнения для расчета коэффициентов концентрации, градиентов напряжений и деформаций в упругой и упругопластической областях деформирования в зависимости от конструктивного исполнения соединения. Также получены зависимости для расчета размеров зоны предразрушения в вершине непровара как функции от параметров нагружения и геометрии соединения. Для угловых по форме соединений сформулированы условия формирования более опасного НДС в вершине непровара и в зоне радиусного перехода от основного металла к наплавленному.

5. Построенные по методике пошагового моделирования траектории трещины от непровара показали совпадающие формы (расхождение не более 9°) с траекториями, полученными в результате проведения экспериментального исследования. Полученные графические зависимости длины растущей трещины от количества циклов нагружения позволяют рассчитывать остаточного ресурс металлоконструкций грузоподъемных машин с разрушением от непровара с учетом геометрической формы и размера соединения.

6. Сравнение усталостных кривых, полученных по результатам численного моделирования и физического эксперимента соединений с острым непроваром показало, что острый непровар (толщиной $< 0,5\text{мм}$) не является готовой макротрещиной. При циклическом нагружении началу роста макротрещины предшествует период предразрушения, составляющий до 10% от общей долговечности в области малоциклового нагружения и до 20% в области многоциклового нагружения. Экспериментальное исследование крестообразного соединения, а также анализ существующих экспериментальных исследований подтверждают достоверность принятых расчетных моделей,

7. Полученные зависимости дополнили программный комплекс расчета усталостной долговечности и трещиностойкости металлоконструкций грузоподъемных машин. С использованием программного комплекса проведен расчет долговечности таврового соединения тяги крепления стационарного ба-

шенного крана и главной балки ковочного крана при исполнении соединения с непроваром различной длины и без него. Результат расчета показал, что при тех же эксплуатационных нагрузках наличие непровара длиной не более чем в половину привариваемого листа снижает долговечность не более чем в 2 раза.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах Перечня ВАК

1. Шлепетинский, А.Ю. Коэффициенты интенсивности напряжений в крестовом сварном соединении с непроваром / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – №4. – С.137 - 146.

2. Шлепетинский, А.Ю. Коэффициенты интенсивности напряжений при росте трещины от непровара в тавровом сварном соединении, нагруженном поперечной силой / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2011. – №3. – С.122 - 129.

3. Шлепетинский, А.Ю. Объемная модель для определения коэффициентов интенсивности напряжений в сварных соединениях грузоподъемных машин / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 823 – 830.

Статьи в научных изданиях

4. Шлепетинский, А.Ю. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с острыми непроварами при сдвиге / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула// XXXIX Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Часть 2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С.253 – 255.

5. Шлепетинский, А.Ю. Влияние геометрии сварного шва в крестовом соединении на коэффициент интенсивности напряжений в вершине непровара / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула// Инновации в транспортном ком-

плексе. Безопасность движения. Охрана окружающей среды : Материалы междунар. науч.-практ. конференции (г. Пермь, 28-29 октября 2010 г.). – Пермь: Изд-во Пермского гос. тех. ун-та, 2010. - Т.3-4. - С.149 – 155.

6. Шлепетинский, А.Ю. Объемная модель сварного соединения с острым непроваром для определения коэффициентов интенсивности напряжений / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула // XL Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С.222 – 224.

7. Шлепетинский, А.Ю. Определение коэффициентов интенсивности напряжений в сварных соединениях металлоконструкций строительных машин с острым непроваром / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула // Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. - №1. – С. 160 – 167.