

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ УЗЛАХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАСЧЕТОМ МАКРО- И МИКРОКОНЦЕНТРАЦИИ

Коростыльёв Л.И., Литвиненко Д.Ю.

*Национальный университет кораблестроения
имени адмирала С.О. Макарова, г. Николаев*

Исследована возможность расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений в сварных тонкостенных конструкциях судового корпуса производением макро- и микроконцентрации напряжений на примерах узла пересечения поясков равновысоких балок и крестообразного соединения. На базе полученных результатов выработаны практические рекомендации по расчету коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах, указанным производением. Выполнен сравнительный анализ вариантов приближенных формул для расчета коэффициента концентрации напряжений, обусловленного наличием сварного шва.

Ключевые слова: сварной узел, коэффициент концентрации напряжений, сварной шов, метод конечных элементов.

Постановка проблемы. Расчет теоретического коэффициента концентрации напряжений сварного соединения в конструкции судового корпуса является одним из этапов анализа его усталостной прочности, в зависимости от используемого метода, как, например, в экспериментально-теоретическом [1] и деформационном методах [2, 3]. Величина коэффициента концентрации напряжений в сварном узле также может быть использована для приближенной оценки его эффективного коэффициента концентрации [3, 4] и приближенной оценки предела выносливости соединения соответственно. Расчет рассматриваемого коэффициента также необходим для сравнительного анализа различных конструктивных вариантов сварных узлов.

Создание «полной» геометрической модели сварного узла в какой-либо САД-системе может быть трудоемким, особенно в случаях, когда исследуются несколько возможных конфигураций рассматриваемого конструктивного элемента. Под «полной» геометрической моделью при этом имеется ввиду детальная 2-х или 3-х мерная модель узла, близкая, по возможности, к реальному изделию, с учетом моделирования формы сварного шва и его микрогеометрических параметров, таких как радиус ρ в месте перехода от основного металла к металлу шва и угол наклона профиля шва Θ в данном месте. Разбивка разработанной модели на конечные элементы с заданным локальным размером сетки всегда является трудоемкой. Кроме того, значительное количество машинного времени потребует и расчет компьютером конечно-элементной модели с плотной локальной сеткой. Одним из способов упростить получение местного поля напряжений и деформаций в случае сварного узла со сложной геометрией является субмоделирование [5], возможность использование такой методики реализовано в ряде распространенных на практике программных комплексов.

Анализ последних исследований и публикаций. Для приближенной оценки теоретических коэффициентов концентрации стыковых, тавровых, крестообразных и некоторых других распространенных на практике типов соединений в литературе представлено значительное количество приближенных зависимостей [2–4, 6]. Каждая из таких зависимостей пригодна для определенных диапазонов соотношений размеров исследуемых соединений.

В задачах усталостной прочности теоретический коэффициент концентрации, как правило, необходим для учета влияния геометрических особенностей исследуемого конструктивного элемента на его усталостную прочность. Существуют, однако, методы, которые не требуют расчета коэффициента концентрации напряжений или деформаций, такие как метод номинального напряжения [2]. Такой метод, однако, пригоден только для экспресс-оценки усталостной прочности исследуемого узла, и не может охватить всего

многообразия используемых на практике сварных конструктивных узлов, являющихся потенциальными очагами зарождения усталостного повреждения.

Согласно работе [7] в случае идеального сварного узла, у которого отсутствуют такие дефекты, как несоосность свариваемых элементов и др., теоретический коэффициент концентрации напряжений в нем можно представить в виде:

$$K_t = K_g \cdot K_w, \quad (1)$$

где K_g – теоретический коэффициент концентрации напряжений, обусловленный общей геометрией сварного узла, которая включает взаимное расположение свариваемых элементов, их толщину s , ширину сварного шва e , высоту усиления сварного шва g или катет K , другие размерные параметры индивидуально для каждого узла; K_w – теоретический коэффициент концентрации напряжений, обусловленный наличием сварного шва (микрогеометрическими параметрами шва). При наличии в сварном узле различных дефектов в уравнении (1) добавляются множители, учитывающие соответствующие факторы.

Подобно зависимости (1) в методе напряжения в горячей точке [2, 7], предназначенном для решения задач усталостной прочности сварных узлов, влияние общей геометрии узла и сварного шва на выносливость конструктивного элемента при заданной переменной нагрузке принимается в расчет порознь. В указанном методе используется понятие конструктивных напряжений, которые определяются методом конечных элементов (МКЭ) с помощью компьютерной модели исследуемого сварного узла, не включающей шов. Количество циклов до усталостного разрушения узла при заданной величине переменного нагружения можно получить, отметив на кривой усталости для стыкового сварного соединения найденное значение размаха конструктивных напряжений. Использование кривой усталости для стыкового сварного соединения в расчете позволяет принять в расчет, кроме влияния общей геометрии, воздействие сварного шва на усталостную прочность узла.

Применение формулы (1) может значительно упростить расчет теоретического коэффициента концентрации сварного узла, при этом влияние параметров ρ и Θ на искомый коэффициент может быть оценено отдельно с помощью расчета величины K_w .

Целью работы является проверка на конкретных примерах возможности расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах произведением коэффициентов концентрации, обусловленных наличием сварного шва и общей геометрией узла без учета шва, а также выработка на базе полученных результатов практических рекомендаций по расчету такого коэффициента в сварных узлах судового корпуса.

Изложение основного материала. Проверка справедливости зависимости (1) выполнялась на примерах крестообразного сварного соединения и узла пересечения поясков равновысоких балок. Геометрия исследуемого крестообразного соединения представлена на рис. 1. Расчет теоретических коэффициентов концентрации выполнялся в ANSYS, для анализа использовался элемент PLANE183 в режиме, моделирующем плоское напряженное состояние. Разбивка на конечные элементы при этом производилась согласно рекомендациям [5, 9], размер ребра элемента в районе перехода от основного металла к металлу шва, таким образом, был не менее $\rho/4$ мм. Указанные рекомендации проверялись на примере крестообразного соединения (рис. 1) с радиусом ρ , равным 0,514 мм. Коэффициент концентрации, полученный при длине ребра элемента $\rho/4$, составлявшей $8,1 \cdot 10^{-5}$ мм, отличался от рассчитанного при длине ребра $2,9 \cdot 10^{-5}$ мм на 1,1 %.

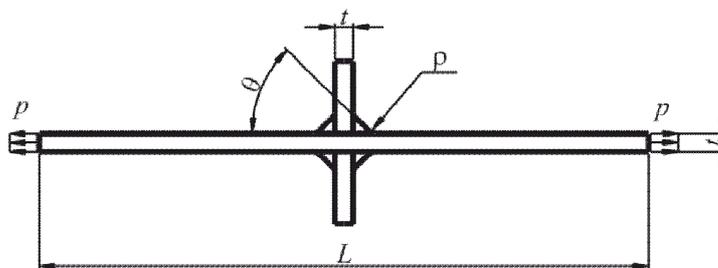


Рисунок 1 – Геометрические параметры крестообразного соединения [8]

Результаты расчетов величины K_t для «полной» модели в ANSYS при различных ρ представлены на рис. 2 и в табл. 1, из которых видно, что кривая зависимости $K_t(\rho)$ переходит в практически прямую при радиусах 8...12 мм. Потому, в качестве значения K_g был выбран теоретический коэффициент концентрации при $\rho=10$ мм.

Таблица 1 – Сравнение коэффициентов концентрации напряжений, рассчитанных с помощью «полной» модели узла и с помощью зависимости (1) при $\Theta=45^\circ$

ρ , мм	K_w	K_g	K_t	$K_g \cdot K_w$	g , мм	e , мм	δ , %	Тип разделки кромки	Условное обозначение согласно ГОСТ 5264-80 [10]
12,00	–	–	1,28	–	–	–	–		
10,00	–	–	1,35	–	–	–	–		
8,00	–	–	1,39	–	–	–	–		
6,00	–	–	1,51	–	–	–	–		
3,47	1,60	1,35	1,76	2,15	2	19	22,20	V-образная	C17
2,30	1,71	1,35	2,02	2,31	2	19	14,36	V-образная	C17
1,50	1,88	1,35	2,31	2,54	2	19	9,96	V-образная	C17
0,71	2,32	1,35	2,92	3,14	2	19	7,55	V-образная	C17
0,52	2,15	1,35	3,21	2,90	1	19	9,84	V-образная	C17
0,52	2,44	1,35	3,21	3,29	2	19	2,51	V-образная	C17
0,41	2,72	1,35	3,51	3,66	2	19	4,47	V-образная	C17
0,30	3,94	1,35	3,88	3,96	2	19	2,22	V-образная	C17
0,18	2,62	1,35	4,50	3,54	1	19	21,45	V-образная	C17
0,18	3,28	1,35	4,50	4,43	2	19	1,67	V-образная	C17
0,10	4,14	1,35	5,46	5,59	2	19	2,38	V-образная	C17
0,52	2,49	1,35	3,21	3,36	2	17	4,69	V-образная	C17
0,18	3,34	1,35	4,50	4,50	2	17	0,04	V-образная	C17
2,30	1,65	1,35	2,02	2,23	2	10	10,4	X-образная	C25
1,50	1,86	1,35	2,31	2,51	2	10	8,66	X-образная	C25
0,71	2,28	1,35	2,92	3,08	2	10	5,65	X-образная	C25
0,52	2,50	1,35	3,21	3,38	2	10	5,12	X-образная	C25
0,18	3,45	1,35	4,50	4,66	2	10	3,49	X-образная	C25

В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа теоретических коэффициентов концентрации, рассчитанных по формуле (1) и с помощью «полной» модели узла (рис. 1). Модуль разницы между результатами обозначен δ . Высота усиления и ширина стыкового сварного шва для расчета коэффициента K_w подбирались согласно требованиям стандарта [10]. Форма профиля стыкового сварного шва для определения теоретического коэффициента концентрации, обусловленного наличием сварного шва, моделировалась как с помощью сплайна, так и дугами. Представленные в табл. 1

результаты расчета K_w для швов с V-образной разделкой кромок были получены на плоских моделях стыковых соединений, построенных с помощью дуг. Результаты оценки величины K_w при X-образной разделке кромок, представленные в табл. 1, получены с использованием сплайнов для построения плоской модели. Существенной разницы между значениями, рассчитанными на моделях, построенных посредством применения дуг и сплайнов, не наблюдалось. Однако, при использовании сплайнов коэффициент K_w оказывался несколько выше. Например, для стыкового шва с $\rho=0,713$ мм, $e=17$ мм, $g=2$ мм и V-образной разделкой кромок величина K_w составила 2,296 при построении профиля шва дугами. При использовании сплайна K_w был равен 2,388. Для шва с $\rho=0,181$ мм, такими же размерными параметрами, как и в предыдущем примере, V-образной разделкой кромок, величина K_w при применении дуг составляла 3,338, а при применении сплайна $K_w=3,546$.

Ширины «фиктивных» стыковых сварных швов e для определения коэффициентов K_w принимались на уровне номинальной величины согласно стандарту [10] для толщины свариваемых встык листов 12 мм. Указанная толщина соответствует толщине неразрезного компонента узла на рис. 1. Таким образом, величина e составляла 19 мм для случая V-образной разделки кромок. Результаты расчетов для $e=19$ мм представлены в табл. 1. В указанной таблице также представлены результаты расчетов при ширине шва 17 мм, которая соответствует номинальной, уменьшенной на величину предельного отклонения. Как видно из таблицы, существенной разницы между значениями K_w при ширинах стыкового шва с V-образной разделкой кромок 17 мм и 19 мм нет.

Результаты табл. 1, рассчитанные для X-образной разделки кромок стыкового соединения, были получены при ширине шва, соответствующей, согласно [10], минимальной для данной толщины соединяемых элементов.

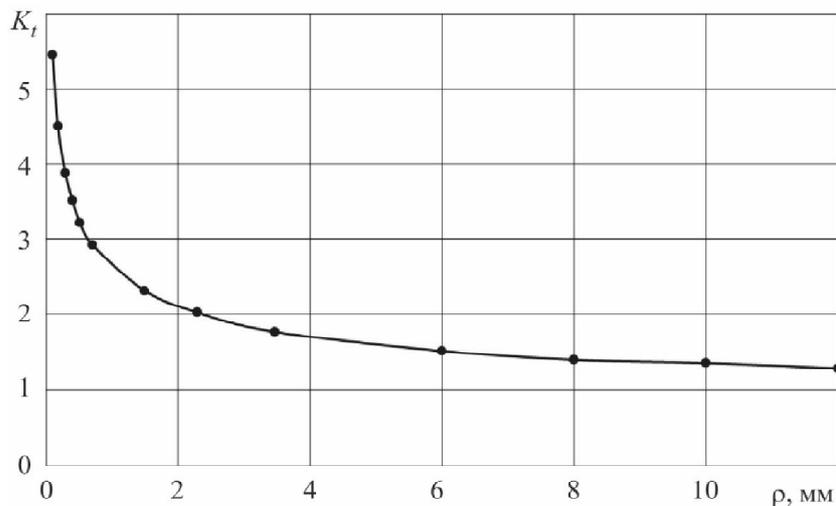


Рисунок 2 – Зависимость теоретического коэффициента концентрации напряжений от радиуса перехода ρ в сварном шве

Как видно из результатов представленной выше таблицы, разница между теоретическими коэффициентами концентрации напряжений K_t , полученными на «полной» модели, с величинами K_t , определенными по формуле (1), уменьшается по мере снижения величины радиуса перехода ρ . Максимальное расхождение между значениями K_t , определенными на «полной» модели и по зависимости (1), в случае высоты усиления стыкового шва равного 2 мм, составляло 22,2 % при $\rho=3,467$ мм. Такое значения радиуса, однако, не характерно для угловых швов, полученных распространенными на практике видами сварки. Кроме того, следует учитывать то, что моделировать стыковые швы с большими радиусами перехода и подобранными размерами согласно [10] (или другим стандартам) будет затруднительно, вследствие рассогласованности размерных параметров. Коэффициенты K_t , рассчитанные с помощью стыковых швов с высотой

усиления 1 мм, показывали более высокие расхождения со значениями K_t , определенными на «полной» модели.

Таким образом, при расчете теоретического коэффициента концентрации напряжений по зависимости (1) высоту стыкового шва для определения величины K_w следует подбирать максимально возможной для данной толщины соединяемых элементов с учетом допусков согласно нормативным документам. Ширину же следует принимать как номинальную, уменьшенную на величину предельного отклонения. Расхождение в результатах между X-образной и V-образной разделкой кромок так же не было существенным.

Расчет коэффициента K_w , очевидно, следует производить подбором сварных стыковых швов с X-образной разделкой кромок, так как такие швы будут «более острыми концентраторами» по сравнению со швами с V-образной разделкой из-за большей максимально допустимой высоты и меньшей минимально допустимой ширины шва согласно стандарту [10]. Такие приемы позволят получить результаты с погрешностями «в сторону завышения».

Справедливость зависимости (1) также проверялась на примере узла пересечения поясков равновысоких балок, представленном на рис. 3а. Для такого узла методом конечных элементов в САЕ ANSYS был проведен анализ напряженного состояния «полной» модели с учетом наличия 3-х плоскостей симметрии.

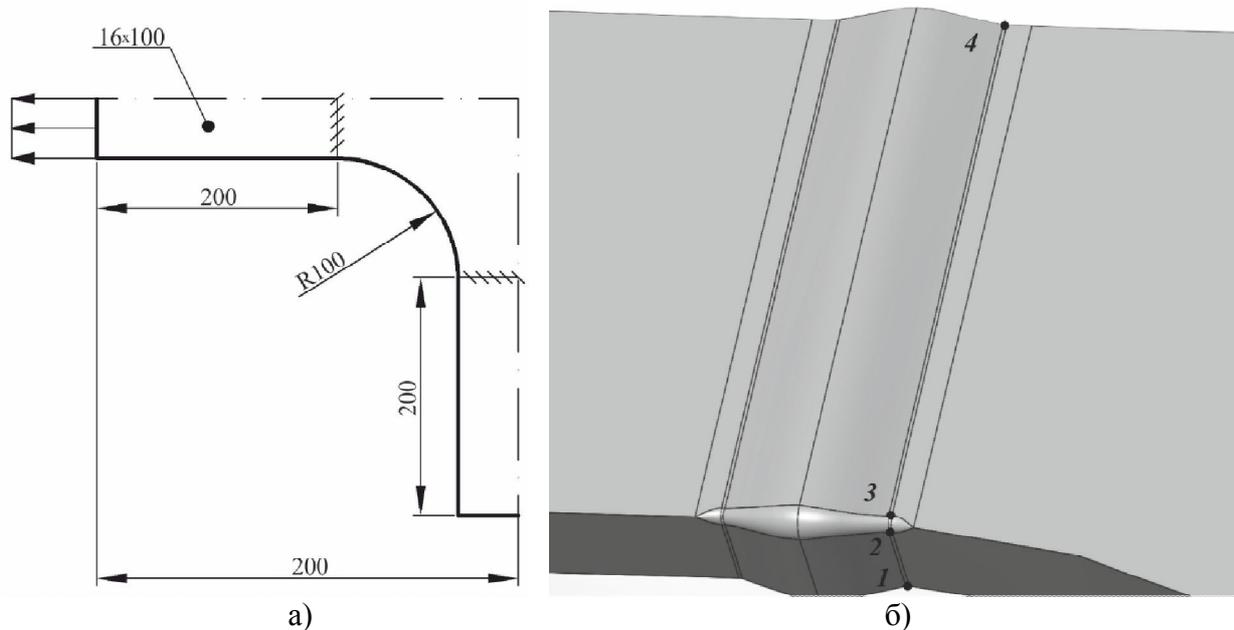


Рисунок 3 – Узел пересечения поясков равновысоких балок: а – схема узла; б – 3D-модель узла

На практике могут возникать задачи, в которых геометрические параметры шва в сварном узле судовой конструкции заранее неизвестны. Известными являются лишь общие размерные параметры сварного узла. Кроме того, следует учитывать, что геометрические параметры шва являются случайными величинами и изменяются вдоль его длины. По указанным причинам ширину сварного шва e и его высоту g целесообразно назначать по нормативным документам, исходя из предельных величин, чтобы получить значения коэффициентов концентрации «с запасом в сторону завышения». Характеристики стыкового шва в рассматриваемом узле назначались согласно [10] и были следующими: сварное соединение С25 с двухсторонней разделкой кромок, ширина шва $e=14$ мм (соответствует номинальному значению при данной толщине металла), высота усиления шва $g=2$ мм (соответствует значению, близкому к максимально возможному с учетом предельных отклонений). Острота концентратора напряжений увеличивается с увеличением отношения g/e , наибольшее влияние на коэффициент K_t оказывает величина радиуса ρ и величина g . Таким образом, при назначении параметра g была принята его величина, близкая к максимально допустимой с учетом предельного

отклонения. Радиус ρ был назначен с обеспеченностью 50 % согласно обобщенным статистическим данным для угловых сварных швов, полученных ручной дуговой сваркой [11]. Его величина составляла 0,986 мм. Угол Θ определялся по приближенной формуле:

$$\Theta = \arctg(2 \cdot g/e) + \delta,$$

где δ – произвольно назначаемый запас. Таким образом, угол Θ составлял 18° .

3D-модель исследуемого сварного узла представлена на рис. 3б. Необходимый размер ребер элементов, регламентируемый [5], в месте перехода от основного металла к металлу шва достигался локальным уплотнением сетки. Для расчета использовались тетраэдрические элементы второго порядка.

Результаты расчета приведенных напряжений по критерию Мизеса в при величине номинальных напряжений 1 Па показаны на рис. 4а.

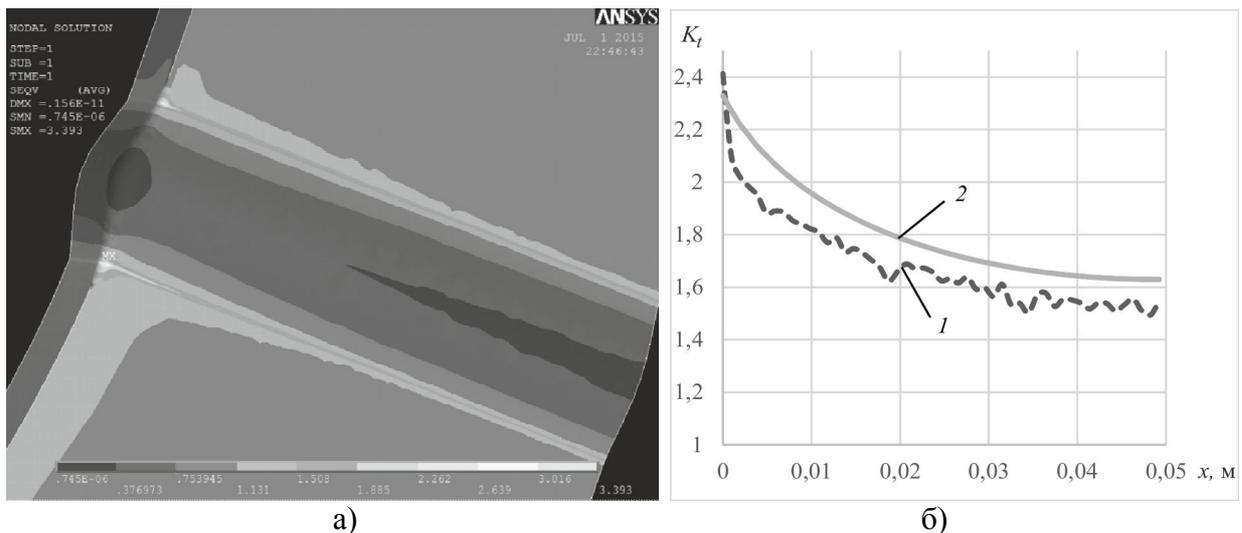


Рисунок 4 – Концентрация напряжений в узле пересечения поясков равновысоких балок: а – результаты расчета напряжений в CAE ANSYS; б – изменение теоретического коэффициента концентрации вдоль линии 3-4 (рис. 3б)

Величина максимальных напряжений, расположение наиболее напряженной области и ее размер в данном случае будут зависеть от исполнения рассматриваемого шва сварщиком и от того, каким образом будет смоделирована данная зона при разработке 3D-модели узла. Наибольшие напряжения, как видно из рис. 4а, приходятся на место перехода от основного металла к металлу шва, где образуется «мениск», которое соответствует линии 1-2-3-4 на рис. 3б. Для проверки справедливости зависимости (1) рассматривалось распределение напряжений по линии 3-4. Линия, соединяющая точки 3 и 4, характерна тем, что до некоторого расстояния от точки 3, на напряжения, действующие вдоль данной линии, оказывает влияние концентрация напряжений, обусловленная общей геометрией узла и радиусом перехода $R=100$ мм (рис. 3а). Указанное влияние ослабевает и нивелируется по мере удаления от точки 3. Таким образом, величина теоретического коэффициента концентрации напряжений на значительном удалении от данной точки соответствует величине K_t для стыкового шва с описанными выше размерами. Изменение теоретического коэффициента концентрации напряжений K_t вдоль линии 3-4, рассчитанное с помощью CAE ANSYS, показано на рис. 4б кривой 1.

Чтобы получить изменение теоретического коэффициента концентрации напряжений K_t вдоль линии 3-4 по формуле (1), был произведен расчет в ANSYS коэффициента K_w для описанного выше стыкового соединения. Величина K_w составляла 1,89. Следует заметить, что теоретический коэффициент концентрации напряжений в стыковом соединении может также быть рассчитан по приближенным зависимостям, описанным в [2–4], 6]. Полученное значение K_w было затем умножено на величину $K_g(x)$,

которая постепенно уменьшалась по мере удаления от точки 3 и приближения к точке 4 (рис. 3б). График функции $K_g(x)$ был получен в САЕ ANSYS на плоской модели, соответствующей узлу на рис. 3, а без сварного шва. График изменения напряжений в плоской модели узла без шва вдоль линии, совпадающей по расположению с линией 3-4, при номинальных напряжениях 1 Па являлся графиком функции $K_g(x)$. Результаты расчета по формуле (1) показаны на рис. 4б кривой 2.

Из рис. 4, б видно, что использование зависимости (1) показывает результаты качественно соответствующие расчету «полной» 3D модели узла в ANSYS. Количественно результаты расчета по исследуемой формуле превышают результаты расчета 3-мерной «полной» модели по всей рассматриваемой длине шва не более, чем на 10%. Таким образом, на данном примере показано, что формула (1) позволяет получить величину теоретического коэффициента концентрации напряжений близкую к рассчитанной методом конечных элементов «с запасом в сторону завышения».

Чтобы сократить объем вычислений при расчете сварного узла судового корпуса целесообразно использовать приближенные формулы для расчета коэффициента K_w , а коэффициент K_g , ввиду значительного разнообразия конструкций сварных узлов, рассчитывать с помощью МКЭ и доступной системы инженерного анализа. Для некоторых типов узлов, например, для пластин с вырезами различной формы и способами приложения нагрузки, можно найти аналитические решения [3]. Чтобы рассчитывать величину K_w необходимо обладать простой и всеобъемлющей формулой для оценки теоретического коэффициента концентрации напряжений в стыковом соединении. Ряд представленных в [2–4, 6] зависимостей имеют ограничения по размерам рассчитываемых соединений. Кроме того, указанные формулы обладают различной точностью. Ниже приведены исследуемые в данной работе зависимости для приближенной оценки теоретического коэффициента концентрации напряжений в стыковом соединении.

Для расчета коэффициента K_t стыковых сварных соединений с полным проплавлением, X-образной разделкой кромок и углом раствора кромок разделки равным 90° в [3], [12] представлена формула Лоуренса. Данная зависимость имеет такой вид:

$$K_t = 1 + \alpha \cdot \left(\frac{s}{\rho} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где α – коэффициент, зависящий от величины угла наклона профиля шва в месте перехода от основного металла к металлу шва.

В работе [2] представлен следующий вариант формулы (2):

$$K_t = 1 + 0,27 \cdot \tan(\theta)^{0,25} \cdot \left(\frac{s}{\rho} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

Для стыковых сварных швов с X-образной разделкой кромок, подвергаемых растягивающей и изгибной нагрузкам, в [2] представлена зависимость, для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений, следующего вида:

$$K_t = 1 + \alpha' \cdot \sin(\theta)^{\lambda_1} \cdot \left(\frac{s}{\rho} \right)^{\lambda_2}, \quad (4)$$

где коэффициент α' равен 0,728 при действии растягивающей нагрузки; показатели степени $\lambda_1=0,932$ и $\lambda_2=0,382$ при таком же виде нагрузки.

В [3], [6] представлены такие зависимости для приближенного определения теоретического коэффициента концентрации напряжений в стыковом шве:

$$K_t = 1 + \frac{1 - e^{-0,9 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{s}{2 \cdot g} + 1}}}{1 - e^{-0,45 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{s}{2 \cdot g} + 1}}} \cdot \left[\frac{1}{2,8 \cdot \left(2 \cdot \frac{g}{s} + 1 \right) - 2} \cdot \frac{g}{\rho} \right]^{0,65}, \quad (5)$$

$$K_t = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{\rho}{g} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\theta}{2}\right) + 4 \cdot \frac{\rho}{s} + 5 \cdot \frac{\rho}{e + \rho} \right)^2}} + 1 \quad (6)$$

Согласно [6] формула (5) применима для стыковых сварных соединений со следующими соотношениями размеров: $\rho/s=0,05\dots 0,1$; $g/s=0,2\dots 0,25$; $\Theta=30^\circ\dots 45^\circ$; $e/s=1\dots 2,3$, а зависимость (6) для стыковых соединений с такими соотношениями размеров: $\rho/s=0,01\dots 0,1$; $g/s=0,1\dots 0,2$; $\Theta=15^\circ\dots 30^\circ$; $e/s=0,1\dots 2,3$.

При выборе расчетной формулы следует учитывать, что некоторые размеры «фиктивного» стыкового сварного шва, с помощью которого оценивается величина K_w , могут отличаться от характерных размеров швов, которые встречаются на практике. Сравнение различных вариантов приближенных зависимостей для определения коэффициента K_t в стыковых сварных соединениях показано в табл. 2. Другие формулы, представленные в [2]–[4], [6] в табл. 2 не включались, по причине значительных расхождений с расчетом в САЕ ANSYS, громоздкой структуры либо по причине узкого диапазона соотношений размеров шва, для которого рекомендуется рассматриваемая зависимость.

Таблица 2 – Результаты оценки микроконцентрации напряжений различными формулами и МКЭ

s, мм	ρ/s	g/s	e/s	Θ , град	Тип разделки кромки	Рассчитанные значения K_t					
						МКЭ	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
12	0,015	0,167	1,417	45	V-образная	3,44	3,20	3,20	3,62	3,68	3,09
16	0,062	0,125	0,875	17	X-образная	1,89	1,75	1,81	1,67	1,57	1,405
12	0,043	0,083	1,583	45	V-образная	2,15	2,30	2,30	2,75	2,14	1,746
12	0,043	0,167	1,583	45	V-образная	2,44	2,30	2,30	2,75	2,36	2,05
12	0,059	0,167	1,583	45	V-образная	2,32	2,11	2,11	2,55	2,1	1,85
12	0,015	0,167	0,833	45	X-образная	3,45	3,20	3,20	3,62	3,68	2,95
12	0,043	0,167	0,833	45	X-образная	2,50	2,30	2,30	2,75	2,36	1,973
12	0,059	0,167	0,833	45	X-образная	2,28	2,11	2,11	2,55	2,10	1,79

Как видно из табл. 2, наиболее близкие оценки K_w к расчету МКЭ показывали формулы (2), (3), (4), (5). Выше было указано, что размеры «фиктивного» сварного стыкового шва для оценки величины K_w и их соотношения могут отличаться от тех, что встречаются в действительности. Поэтому целесообразнее использовать зависимости для определения K_w , не содержащие всех размерных параметров шва, как, например, (5). Кроме того, (5) имеет громоздкую структуру. Величина K_w , рассчитанная по формулам (2), (3), (4) зависит только от толщины исследуемого соединения, радиуса ρ и угла Θ . В формуле Лоуренса (2) коэффициент α для растягивающей нагрузки резко уменьшается при уменьшении угла наклона профиля шва в месте перехода от основного металла к металлу шва [12], ее вариант (3) при малых углах Θ показывает несколько более высокие величины коэффициента концентрации, в сравнении с (2). Кроме того, формула (2) требует операцию интерполяции для расчета α . Зависимость (4), как видно из табл. 2, показывала близкие (в основном несколько завышенные) результаты к расчетам методом конечных элементов. Таким образом, наиболее целесообразно использовать для расчета

K_w формулы (3) и (4), причем, использование первой показывает результаты с небольшим отклонением «в сторону уменьшения» от МКЭ, а вторая – «в сторону завышения».

Все описанные выше коэффициенты концентрации напряжений рассчитывались на базе приведенных напряжений по критерию Мизеса.

Из выполненного в работе анализа следует, что расчет теоретического коэффициента концентрации напряжений, обусловленного наличием сварного шва, можно производить посредством расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений в стыковом сварном соединении, размерные параметры шва которого соответствуют таким же для исследуемого узла. В случае, когда шов исследуемого сварного узла является угловым, недостающие характеристики стыкового шва подбираются согласно нормативным документам, регламентирующим размеры сварных швов, для такого вида сварки, который использовался при изготовлении исследуемого узла. Подбор выполняется таким образом, что высота шва принимается как максимально возможная с учетом предельных отклонений при данной толщине металла, а ширина как минимально возможная также с учетом предельных отклонений. Разделка кромок стыкового шва при этом предполагается X-образной. Теоретический коэффициент концентрации напряжений стыкового соединения может быть рассчитан методом конечных элементов или по приближенным зависимостям, представленным в [2–4, 6]. В данной работе был выполнен анализ таких приближенных зависимостей и предложены оптимальные, с точки зрения авторов, для применения на практике.

Выводы. 1. Оценка теоретического коэффициента концентрации напряжений произведением коэффициентов концентрации напряжений, обусловленных наличием сварного шва и общей геометрией сварного узла без учета шва, для крестообразного сварного соединения и узла пересечения поясков равновысоких балок показала близкие к расчету детализированной модели в САЕ ANSYS результаты, «с запасом в сторону завышения». Расхождение не превышало 10%.

2. Определение теоретического коэффициента концентрации напряжений, обусловленного общей геометрией сварного узла, можно получить расчетом модели исследуемого узла без шва с грубой сеткой. В случае узлов с угловыми швами, сварной узел следует моделировать со швом, размеры которого и угол в месте перехода от основного металла к металлу шва, соответствуют таким же в исследуемом объекте. Радиус перехода, при этом назначается на таком уровне, что его увеличение, не оказывает существенного влияния на величину теоретического коэффициента концентрации напряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коростылев Л. И. Оценка усталостной прочности судовых корпусных конструкций с концентраторами напряжений [Текст] / Л. И. Коростылев // Вторая междунар. конф. по судостроению – ISC'98: Труды, Секция С. – СПб. : ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1998. – С. 160-167.
2. Radaj D. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Second edition [Text] / D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke. – Cambridge : Woodhead Publishing Ltd., 2006. – 639 p.
3. Петин С. В. Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций [Текст] / С. В. Петин. – Л. : Судостроение, 1990. – 224 с.
4. Турмов Г. П. Приближенная оценка выносливости сварных соединений [Текст] / Г. П. Турмов // Судостроение и судоремонт. – Владивосток : Изд-во ДВПИ, 1980. – С. 129-136.
5. Fricke, W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures [Text] / W. Fricke // International Institute of Welding. – IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. – Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010. – 144 p.

6. Махненко В. И. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами [Текст] / В. И. Махненко, Р. Ю. Мосенкис // Автоматическая сварка. – 1985. – №8. – С. 7-18.
7. Caccese V. Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes [Text] / V. Caccese et al. // Marine Structures. – Elsevier, January 2006. – vol. 19 – issue 1. – pp. 1-22.
8. Skorupa M. Fatigue life prediction of cruciform joints failing at the weld toe [Text] / M. Skorupa // Supplement to the welding journal. – August 1992. – P. 269-275.
9. Niemi E. Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components [Text] / E. Niemi. – IISIIW-1221-93 (ex. doc. XIII-1458-92, XV-797-92). – Abington : Abington Publ., 1995. – 69 p.
10. ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры – М. : Стандартформ, 2005. – 35 с.
11. Коростыльов Л. И. Анализ величин радиусов и углов наклона профиля сварных швов в месте перехода от основного металла к металлу шва [Текст] / Л. И. Коростыльов, Д. Ю. Литвиненко // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 87-89.
12. Lawrence, F. V., Predicting the Fatigue Resistance of Welds [Text] / F. V. Lawrence, N. J. Ho, P. K. Mazumdar // Fracture Control Program Report No. 36. – College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, October 1980. – 47 p.

REFERENCES

1. Korostihlev L. I. Ocenka ustalostnoy prochnosti sudovihkh korpusnihkh konstrukciy s koncentratorami napryazheniy [Tekst] / L. I. Korostihlev // Vtoraya mezhdunar. konf. po sudostroeniyu – ISC'98: Trudih, Sekciya S. – SPb. : CNII im. akad. A. N. Krihlova, 1998. – S. 160-167.
2. Radaj D. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Second edition [Text] / D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke. – Cambridge : Woodhead Publishing Ltd., 2006. – 639 p.
3. Petinov S. V. Osnovih inzhenernihkh raschetov ustalosti sudovihkh konstrukciy [Tekst] / S. V. Petinov. – L. : Sudostroenie, 1990. – 224 s.
4. Turmov G. P. Priblizhennaya ocenka vinhoslivosti svarnihkh soedineniy [Tekst] / G. P. Trumov // Sudostroenie i sudoremont. – Vladivostok : Izd-vo DVPI, 1980. – S. 129-136.
5. Fricke, W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures [Text] / W. Fricke // International Institute of Welding. – IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. – Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010. – 144 p.
6. Makhnenko V. I. Raschet koehfficientov koncentracii napryazheniy v svarnihkh soedineniyakh so stihkovihmi i uglovihmi shvami [Tekst] / V. I. Makhnenko, R. Yu. Mosenkis // Avtomaticheskaya svarka. – 1985. – №8. – S. 7-18.
7. Caccese V. Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes [Text] / V. Caccese et al. // Marine Structures. – Elsevier, January 2006. – vol. 19 – issue 1. – pp. 1-22.
8. Skorupa M. Fatigue life prediction of cruciform joints failing at the weld toe [Text] / M. Skorupa // Supplement to the welding journal. – August 1992. – P. 269-275.
9. Niemi E. Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components [Text] / E. Niemi. – IISIIW-1221-93 (ex. doc. XIII-1458-92, XV-797-92). – Abington : Abington Publ., 1995. – 69 p.

10. GOST 5264-80. Ruchnaya dugovaya svarka. Soedineniya svarnihe. Osnovnihe tipih, konstruktivnihe ehlementih i razmerih – M. : Standartiform, 2005. – 35 s.
11. Korostihlyov L. I. Analiz velichin radiusov i uglov naklona profilya svarnikhkh shvov v meste perekhoda ot osnovnogo metalla k metallu shva [Tekst] / L. I. Korostihlyov, D. Yu. Litvinenko // Materiali vseukraïnsjkoï naukovo-tekhnichnoï konferencii z mizhnarodnoyu uchastyu «Suchasni tekhnologii proektuvannya, pobudovi, ekspluatacii i remontu suden, morskikh tekhnichnikh zasobiv i inzhenernikh sporud». – Mikolaïv : NUK, 2015. – S. 87-89.
12. Lawrence, F. V., Predicting the Fatigue Resistance of Welds [Text] / F. V. Lawrence, N. J. Ho, P. K. Mazumdar // Fracture Control Program Report No. 36. – College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, October 1980. – 47 p.

Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. ОЦІНКА КОЕФІЦІЄНТА КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ ВУЗЛАХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ РОЗРАХУНКОМ МАКРО- І МІКРОКОНЦЕНТРАЦІЇ

На прикладах вузла перетину поясків рівновеликих балок і хрестоподібного з'єднання досліджена можливість розрахунку теоретичного коефіцієнта концентрації напружень в зварних тонкостінних конструкціях суднового корпусу множенням коефіцієнтів макро- і мікроконцентрації напружень. На базі отриманих результатів вироблені практичні рекомендації із розрахунку коефіцієнта концентрації напружень у зварних вузлах за допомогою вказаного множення. Виконаний порівняльний аналіз варіантів наближених формул для розрахунку коефіцієнта концентрації напружень, обумовленого наявністю зварного шва.

Ключові слова: зварний вузол, коефіцієнт концентрації напружень, зварний шов, метод скінчених елементів.

Korostylov L.I., Lytvynenko D.Yu. THE ESTIMATION OF THE THEORETICAL STRESS CONCENTRATION FACTOR IN WELDED THIN-WALLED STRUCTURES BY THE CALCULATION OF STRESS MACRO- AND MICROCONCENTRATION

The estimation of the theoretical stress concentration factor in welded thin-walled ship structures by the multiplication of stress macro- and microconcentration factors was investigated considering the beams crossing flanges welded assembly and the cruciform welded joint. The practical guidelines for the estimation of the stress concentration factor in welded assemblies by the mentioned multiplication were developed based on the obtained results. The comparative analysis of the different variants of the approximate formulae for the calculation of the stress concentration factor caused by the presence of weld seam was carried out.

Keywords: welded assembly, theoretical stress concentration factor, weld seam, finite element method.

© Коростильов Л. І., Литвиненко Д. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 10.09.2015