

Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку

К.т.н., доцент Т.И. Летова;*

д.т.н., профессор С.В. Петин^{ов},

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: сварные соединения с непроваром; усталость сварных соединений; МКЭ моделирование напряженности соединений с трещинами; коэффициенты интенсивности напряжений по траектории трещины; кривые усталости сварных соединений с непроваром

В последние десятилетия оценка ресурса сварных соединений становится важным элементом как проектирования, так и определения состояния металлических сварных конструкций в условиях эксплуатации в разных отраслях техники [1–10].

Одни из самых распространенных в сварных конструкциях типов соединений – тавровые и крестообразные соединения, в которых «поток» усилий передается наплавленным металлом. Особое место в этой группе занимают соединения с неполным проплавлением, которые широко применяются по экономическим и технологическим соображениям. Вместе с тем, такие соединения оказываются и наименее надежными в конструкциях, подвергающихся интенсивному переменному нагружению [11–16].

Эти противоречивые обстоятельства на протяжении многих десятилетий, начиная с 1960-х годов, побуждают проводить комплексные исследования сопротивления усталости соединений с неполным проплавлением. Особенность усталости этих соединений определяется конкуренцией «слабых», наиболее напряженных областей на внешней поверхности у перехода от «основного» к наплавленному металлу и у кончика (фронта) внутренней полости – непровара – в наплавленном металле. Современные нормативные документы, по которым рассчитывают ресурс сварных соединений, основаны преимущественно на использовании номинального напряжения как параметра, определяющего повреждение. Согласно этому принципу, сопротивление усталости соединений с неполным проплавлением (как и соединений других типов) характеризуется «расчетными» $S - N$ кривыми, например, класса FAT36 [5, 17].

Использование номинальных напряжений в правилах сопряжено с неопределенностью оценок долговечности, обусловленной множественностью соотношений размера непровара и геометрии соединения. С начала 1970-х годов использовались возможности моделирования трещин техникой конечных элементов и расчета подрастания трещин [18–21]. Однако на данный момент не существует полноценной методики для расчетов усталости соединений с неполным проплавлением.

Метод определения коэффициентов интенсивности напряжений

В настоящей работе описывается возможный подход к расчетной оценке долговечности крестообразных сварных соединений, в которых распространение трещины происходит от внутренней полости. Для описания кинетики усталостной трещины в предположении ее устойчивого подрастания от внутренней полости в соединении используется известное соотношение, «формула Пэриса» [22]:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K(S, a))^m, \quad (1)$$

где N – число циклов нагружения; C и m – эмпирические параметры, зависящие от свойств материала; $\Delta K(S, a)$ – размах коэффициентов интенсивности напряжений (либо размах эффективных коэффициентов интенсивности при учете сжатия в фазе циклического нагружения); S – символ, используемый для обозначения циклического напряжения.

Рост трещины в предположении макроупругого напряженного состояния наплавленного металла соединения при циклическом нагружении определяется коэффициентами интенсивности напряжений. В общем случае при наличии современных программных средств, основанных на применении методов конечных и граничных элементов, имеются широкие возможности для расчета коэффициентов интенсивности напряжений [2, 3, 23, 24]. Однако при реализации инженерных расчетов усталости конструкций для решения различных практических задач (прогнозирование остаточного ресурса, определение периодичности оценок состояния конструкций и пр.) удобнее использовать аналитические зависимости для оценки коэффициентов интенсивности напряжений.

Для определения коэффициентов интенсивности напряжений в месте зарождения разрушения в вершине непровара с помощью МКЭ решалась задача об упругом деформировании плоской модели – крестообразного сварного соединения с начальной трещиной, равной толщине свариваемой детали. Материал – малоуглеродистая сталь. Нагрузка прикладывалась перпендикулярно траектории внутренней полости, при этом предусматривалась симметрия не только соединения и непровара, но и распространяющихся от него усталостных трещин. Схема четверти расчетной модели сварного соединения показана на рисунке 1.

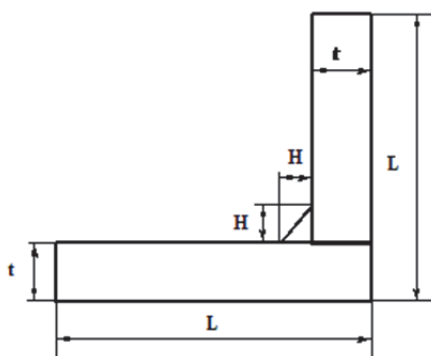


Рисунок 1. Расчетная модель сварного соединения

Ожидаемая траектория трещины была установлена по результатам анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) сварного узла без трещины (рисунок 2) в предположении, что для расчетной оценки траектории превалирует мода смещения поверхностей трещины, отвечающая нормальному отрыву. Разбиение области на конечные изопараметрические элементы в месте ожидаемой траектории трещины представлено на рисунке 3. Пошаговый рост трещины моделировался последовательным освобождением связей в узлах сетки элементов.

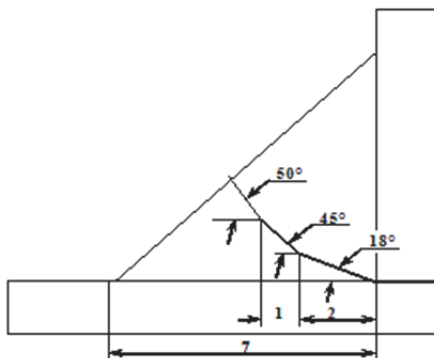


Рисунок 2. Ожидаемая траектория трещины, растущей из непровара

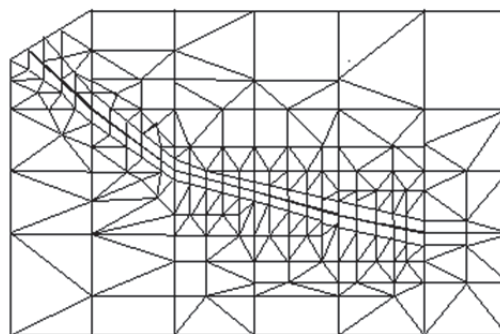


Рисунок 3. Конечно-элементная модель в месте ожидаемой траектории трещины

Коэффициенты интенсивности напряжений определялись экстраполяцией к вершине трещины. Численный эксперимент производился для восьми значений толщины свариваемых деталей, при этом катет сварного шва H оставался постоянным и равным 7 мм, а отношение t/H , где t – половина толщины свариваемой детали, принималось следующим: 0.590, 0.707, 0.786, 0.883, 1.180, 1.770, 2.360, 3.540. Продвижение трещины ограничивалось глубиной, составляющей порядка 0.70 толщины наплавленного металла по направлению к внешней

поверхности сварного шва. В расчетах толщина наплавленного металла t_w , измеренная по направлению перпендикулярно к гипотенузе сварного шва, равнялась 4.95 мм.

При дальнейшем подрастании трещины в реальных условиях развивается пластическая зона, протяженность которой увеличивается, особенность вида $1/\sqrt{r}$ исчезает в лигаменте, соответственно, становится затруднительным определить коэффициенты интенсивности напряжений перед вершиной трещины [25].

Анализ коэффициентов интенсивности напряжений, полученных по результатам численного эксперимента, позволил вывести инженерную формулу для их расчета. Предложенная зависимость имеет преимущества перед экстраполяцией к вершине трещины, требующей многократного вычисления напряженного состояния при ее подрастании. Структура формулы представляется в виде произведения коэффициента интенсивности напряжений для бесконечной пластины [26] на поправочные коэффициенты, которые включают параметры, влияющие на рост трещины в сварном соединении (длину трещины, толщину свариваемых деталей, характерные размеры сварного шва):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/t) \Phi(t/H), \quad (2)$$

где $F(a/t)$ и $\Phi(t/H)$ – поправочные коэффициенты; σ – номинальное напряжение, МПа; a – длина трещины, измеренная от оси симметрии, мм; t – половина толщины стенки сварного узла, мм; H – катет сварного шва, мм.

Зная коэффициенты интенсивности напряжений, полученные по результатам численного эксперимента, а также длину трещины a и номинальное напряжение σ , можно определить величину некоторого поправочного коэффициента $F(a/t)$, который для выбранных соотношений t/H (8 вариантов) представляется в виде серии кривых, имеющих различные точки начала отсчета. Следующий шаг состоит в приведении кривых к единому началу отсчета, в данном случае – к единице, для этого каждое значение, принадлежащее рассматриваемой кривой, следует разделить на значение, соответствующее ее началу. Таким образом, для выбранных соотношений t/H были получены нормированные поправочные коэффициенты, которые представлены на рисунке 4 в координатах $a/t - F(a/t)$.

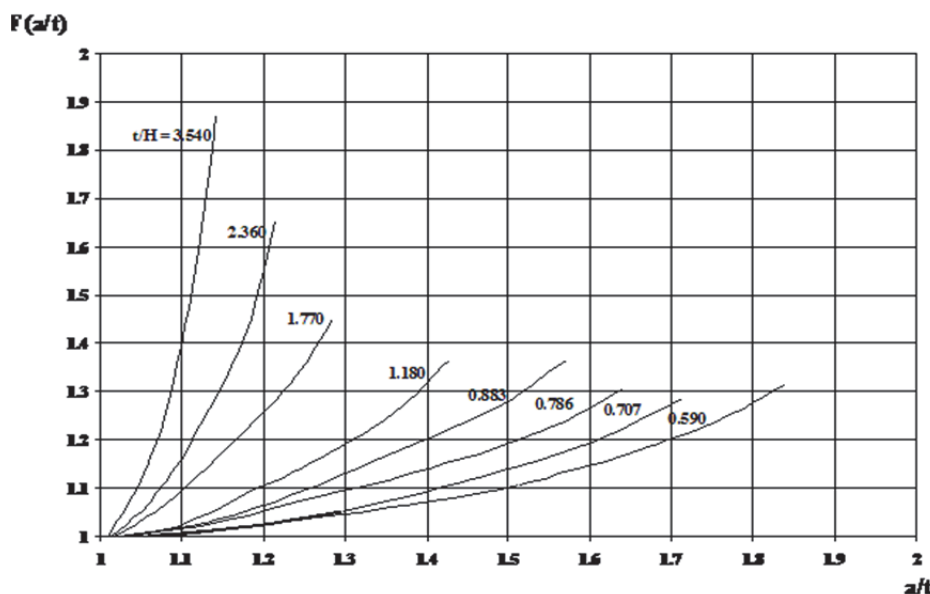


Рисунок 4. Поправочные коэффициенты, используемые для расчета коэффициентов интенсивности напряжений по формуле (2)

Второй поправочный коэффициент $\Phi(t/H)$, входящий в формулу (2), аналитически описывает кривую, построенную в координатах t/H – значение начала отсчета. Получена формула для определения коэффициента $\Phi(t/H)$:

$$\Phi(t/H) = 0.5676 \left[\ln(t/H) + 1.6665 \right]. \quad (3)$$

Для расчетов, выполняемых согласно формуле (2), кроме параметров, характеризующих рассматриваемый объект, необходимо наличие кривых, показанных на рисунке 4. Так как они визуально напоминают одну из ветвей восходящей параболы, то была предпринята попытка их аналитического описания:

$$F(t/H, a/t) = A(t/H)(a/t - 1)^2 + 1. \quad (4)$$

В предлагаемой зависимости (4) наиболее трудоемкой оказалась процедура подбора коэффициента $A(t/H)$:

$$A(t/H) = -0.0591 (t/H)^5 + 0.0824 (t/H)^4 + 2.1418 (t/H)^3 - 3.6826 (t/H)^2 + 4.1218 (t/H) - 1.1815.$$

Таким образом, для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений может использоваться формула, в которой все поправочные коэффициенты определяются аналитически:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(t/H, a/t) \Phi(t/H). \quad (5)$$

Результаты расчета коэффициентов интенсивности напряжений согласно приведенным выше зависимостям (2) и (5) сопоставлялись со значениями аналогичных коэффициентов, полученными по предложенной Франком и Фишером формуле [11]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a \sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \frac{A_1 + A_2 a/W}{1 + 2H/t_p}, \quad (6)$$

где $t_p = 2t$ – толщина стенки сварного узла;

$$W = H + t_p/2; \quad H/t_p = 0.2 \dots 1.2; \quad a/W = 0.0 \dots 0.7;$$

$$A_1 = 0.528 + 3.287 (H/t_p) - 4.361 (H/t_p)^2 + 3.696 (H/t_p)^3 - 1.875 (H/t_p)^4 + 0.415 (H/t_p)^5;$$

$$A_2 = 0.218 + 2.717 (H/t_p) - 10.171 (H/t_p)^2 + 13.122 (H/t_p)^3 - 7.755 (H/t_p)^4 + 1.783 (H/t_p)^5.$$

В таблице 1 представлены коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитанные для восьми значений толщин свариваемых деталей при номинальном напряжении, равном 10 МПа, и при условии равенства катетов швов 7 мм с использованием метода экстраполяции к вершине трещины и приближенных способов согласно формулам (2), (5) и (6).

Таблица 1. Коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитанные методом экстраполяции к вершине трещины и приближенными способами

a, мм	$K_I, \text{Н/мм}^{3/2}$				a, мм	$K_I, \text{Н/мм}^{3/2}$			
	МКЭ	2	5	6		МКЭ	2	5	6
	$t/H = 0.590$					$t/H = 0.707$			
4.340	24.514	23.869	24.248	24.816	5.159	30.246	30.158	30.640	30.481
4.970	26.536	26.207	26.365	27.466	5.789	32.532	32.521	33.034	33.559
5.600	28.701	28.713	28.958	30.360	6.419	35.467	35.456	36.122	36.970
6.250	31.685	31.680	32.239	33.725	7.069	38.991	39.008	40.156	40.981
7.100	36.998	37.001	37.616	39.014	7.919	44.564	44.575	46.915	47.344
7.600	41.470	41.472	41.423	43.337	8.479	49.764	49.758	52.387	52.576

Летова Т.И., Петин С.В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку

	$t/H = 0.786$					$t/H = 0.883$			
5.712	34.141	34.280	34.830	34.336	6.391	38.928	39.220	39.850	39.093
6.342	37.288	37.276	37.371	37.708	7.021	42.396	42.381	42.548	42.825
6.972	40.987	40.978	40.729	41.472	7.651	46.638	46.645	46.207	47.018
7.622	44.820	44.825	45.178	45.921	8.301	51.942	51.938	51.121	52.001
8.472	50.827	50.807	52.698	53.012	9.151	59.221	59.226	59.497	59.974
9.032	56.219	56.210	58.813	58.858	9.711	66.043	66.039	66.338	66.566
	$t/H = 1.180$					$t/H = 1.770$			
8.470	52.652	53.640	54.508	53.589	12.600	79.900	79.902	81.230	80.952
9.100	57.000	56.989	57.646	58.376	13.230	86.058	86.051	85.469	87.514
9.730	62.540	62.550	62.219	63.817	13.860	94.155	94.194	92.508	95.034
10.380	68.300	68.287	68.588	70.339	14.510	103.638	103.665	102.900	104.110
11.230	77.422	77.452	79.681	80.856	15.360	117.450	117.422	121.605	118.837
11.790	86.439	86.447	88.832	89.594	15.920	130.415	130.410	137.278	131.129
	$t/H = 2.360$					$t/H = 3.540$			
16.730	103.852	103.909	105.693	106.027	24.990	148.190	147.387	150.023	151.124
17.360	111.600	111.563	111.418	114.027	25.620	158.906	158.933	158.814	161.479
17.990	122.140	122.189	121.828	123.226	26.250	174.189	174.169	176.144	173.421
18.640	136.801	136.771	137.730	134.360	26.900	197.500	197.567	203.292	187.921
19.490	159.812	159.818	166.849	152.480	27.750	246.880	246.948	253.520	211.604
20.050	188.302	188.261	191.426	167.645	28.310	293.872	293.822	296.040	231.490

На рисунках 5 и 6 показаны графики изменения коэффициентов интенсивности напряжений по мере подрастания трещины, построенные по данным таблицы 1:

- кривые в виде сплошных линий соответствуют коэффициентам, полученным методом экстраполяции к вершине трещины;
- кривые в виде точечных линий соответствуют коэффициентам, рассчитанным приближенными способами согласно предлагаемой формуле (5) (рисунок 5) и согласно формуле Франка – Фишера (6) (рисунок 6).

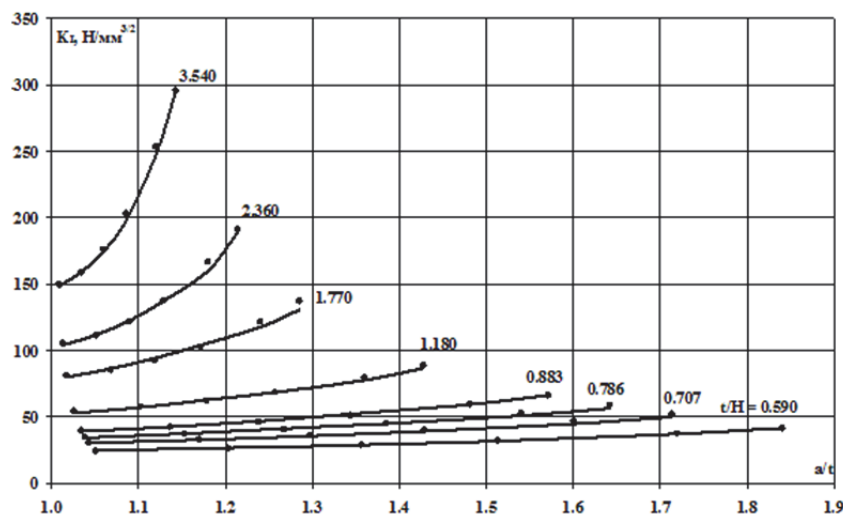


Рисунок 5. Коэффициенты интенсивности напряжений по МКЭ (сплошные линии) и по предлагаемой формуле (5) (точечные линии)

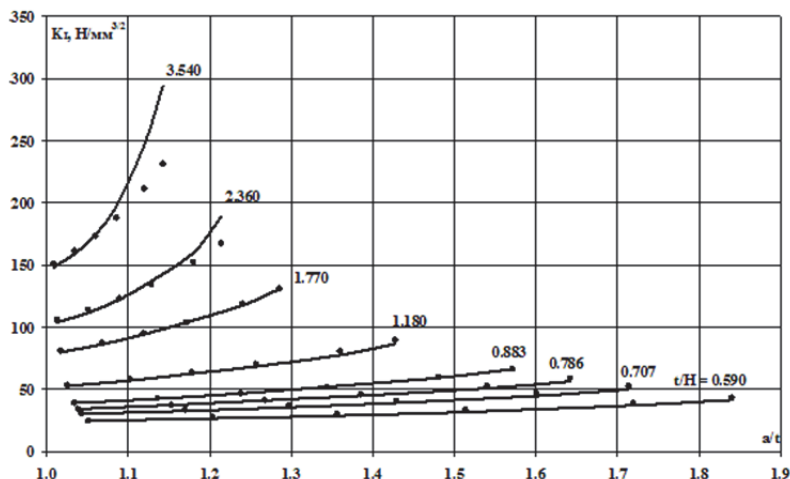


Рисунок 6. Коэффициенты интенсивности напряжений по МКЭ (сплошные линии) и по формуле Франка – Фишера (6) (точечные линии)

Как видно из рисунков 5 и 6, при использовании метода конечных элементов и приближенных аналитических способов для расчета коэффициентов интенсивности напряжений достигается вполне удовлетворительное согласование полученных результатов. Однако в случае увеличенных значений соотношения t/H (2.360 и 3.540) зависимость Франка – Фишера (6) дает заниженные значения коэффициентов интенсивности напряжений, что обусловливается принятым в ней ограничением $a/W = 0.0 \dots 0.7$.

Оценка долговечности на стадии роста трещины из непровара

Кривые усталости $S-N$ для крестообразного сварного соединения с непроваром строились в логарифмических координатах при расчетных нагрузках, равных $S = 50$ МПа ($\lg S = 1.70$) и $S = 60$ МПа ($\lg S = 1.78$), с применением формулы (1), в которой $C = 10^{-10}$ и $m = 3$. В расчетах числа циклов до разрушения материала коэффициенты интенсивности напряжений вычислялись для восьми значений толщины свариваемых деталей по приближенной зависимости (5):

- для трещины, которая соответствует предельной нагрузке $S t = \sigma (t_w - a_c)$, где σ – предел текучести материала, МПа (в расчетной модели – 355 МПа); a_c – длина трещины для предельного состояния, мм;
- для трещины, которая прорастает на глубину, составляющую порядка 0.70 толщины наплавленного металла по направлению перпендикуляра к гипотенузе сварного шва.

Результаты расчетов числа циклов до разрушения материала крестообразного сварного соединения с непроваром применительно к двум рассматриваемым типам трещин приведены в таблице 2 (для трещины, соответствующей предельной нагрузке) и в таблице 3 (для трещины, прорастающей на глубину порядка 0.70 толщины наплавленного металла по направлению перпендикуляра к гипотенузе сварного шва).

Таблица 2. Число циклов до разрушения материала для трещины, соответствующей предельной нагрузке

t/H	0.590	0.707	0.786	0.883	1.180	1.770	2.360	3.540
a, м	0.0076	0.0085	0.0090	0.0097	0.0118	0.0159	0.0201	0.0283
lg S = 1.70								
a_c, м	0.0085	0.0092	0.0097	0.0103	0.0120	0.0156	0.0191	0.0262
lg N	5.526	5.257	5.080	4.898	4.511	3.939	3.543	2.894
lg S = 1.78								
a_c, м	0.0084	0.0091	0.0095	0.0101	0.0118	0.0147	0.0187	0.0256
lg N	5.284	5.015	4.835	4.654	4.263	3.614	3.254	2.410

Таблица 3. Число циклов до разрушения материала для трещины, прорастающей на глубину порядка 0.70 толщины наплавленного металла

t/H	0.590	0.707	0.786	0.883	1.180	1.770	2.360	3.540
a, м	0.0076	0.0085	0.0090	0.0097	0.0118	0.0159	0.0201	0.0283
lg S	число циклов до разрушения материала (lg N)							
1.70	5.492	5.229	5.053	4.875	4.500	3.960	3.605	3.102
1.78	5.254	4.991	4.815	4.637	4.262	3.723	3.368	2.865

На рисунке 7 показаны кривые усталости $S-N$, соответствующие вышеуказанным табличным данным.

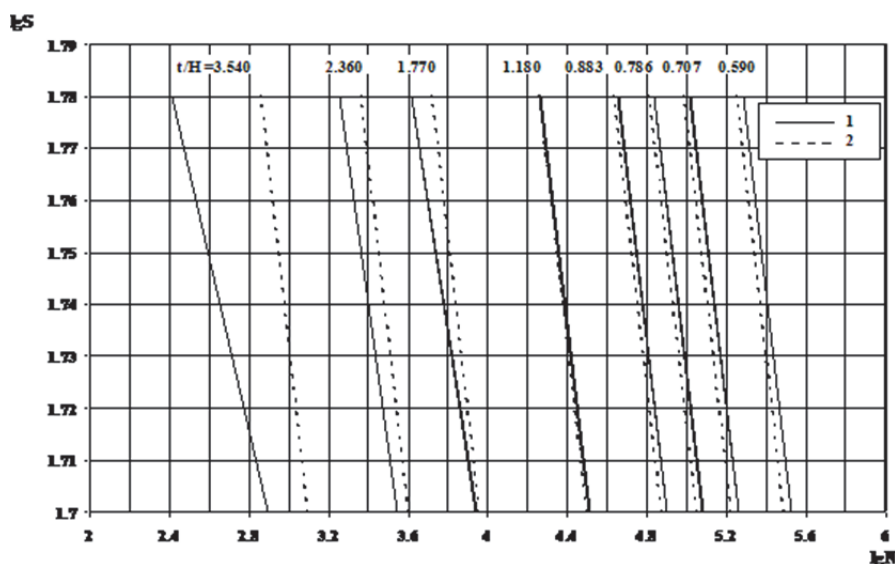


Рисунок 7. Кривые усталости $S-N$: 1 – для трещины, соответствующей предельной нагрузке (сплошные линии); 2 – для трещины, прорастающей на глубину порядка 0.70 толщины наплавленного металла (пунктирные линии)

Заключение

1. Результаты расчетного исследования и оценки коэффициентов интенсивности напряжений дополняют имеющиеся в технической литературе данные.
2. Расчетным путем получены кривые усталости для Т-образных и крестообразных сварных соединений с неповаром при разных соотношениях ширины полости к катету сварного шва.
3. Основные результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при решении инженерных задач, связанных с оценкой усталостной прочности сварных крестообразных соединений с неповаром.

Литература

1. Elber W. The Significance of Fatigue Crack Closure // Damage Tolerance in Aircraft Structures. ASTM STP 486. 1971. Pp. 230–242.
2. Петин С.В. Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990. 224 с.
3. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
4. Jones J., Bennett C., Matamoros A., Rolfe S., Roddis K. Fighting Fatigue in Steel Bridges // TR News, Transportation Research Board (TRB). November-December 2008. Iss. 259. Pp. 25–26.
5. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components / International Institute of Welding. IIW Document XIII-2151r1-07 / XV-1254r1-07. Cambridge, Abington, 2007. 149 p.

Летова Т.И., Петин С.В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку

6. Det Norske Veritas. Fatigue Assessment of Offshore Steel Structures. Recommended Practice (RP-C203). Hovik, Norway. 2006.
7. Fricke W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structure / International Institute of Welding. IIW-Document XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08. Cambridge, Abington, 2008. 38 p.
8. Леонов В.П., Васильев А.К. Разработка подходов к нормированию технологической дефектности сварных соединений конструкций различного назначения // Вопросы материаловедения. 2007. №3. С. 187–203.
9. Ильин А.В., Садкин К.Е. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций // Вопросы материаловедения. 2012. №2. С. 161–176.
10. Петин С.В., Афанасьева И.М. Расчеты усталости судовых конструкций: Техника и проблемы // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. №53. С. 103–108.
11. Frank K.H., Fisher J.W. Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints // Journal of the Structural Division ASCE. 1979. Vol. 105. №ST9. Pp. 1727–1741.
12. Хвостов А.Е., Манжула К.П. Ресурс крестового соединения с трещинообразным непроваром // Сборник «Труды СПбГПУ» №494. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. С. 107–113.
13. Kim W.S., Kim D.H., Lee S.G., Lee Y.K. Fatigue Strength of Load-Carrying Box Fillet Weldment in Ship Structure // Proceedings 8th International Symposium PRADS-2001, Shanghai. September 2001. Vol. 2. Pp. 1161–1167.
14. Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в крестовом сварном соединении с непроваром // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. №4. С. 137–146.
15. Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П. Коэффициенты интенсивности напряжений при росте трещины от непровара в тавровом сварном соединении, нагруженном поперечной силой // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. №3. С. 122–129.
16. Petinov S.V., Kim W.S., Paik Y.M. Assessment of Fatigue Strength of Weld Root in Ship Structure: An Approximate Procedure // Ship and Offshore Structures Journal. Woodhead Publishing. 2006. Vol. 1. №1. Pp. 55–60.
17. EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1–9: Fatigue. BS EN 1993-1-9. 2005.
18. Watwood V.B. The Finite Element Method of Prediction of Crack Behavior // Nuclear Engineering and Design. 1969. Vol. 11. №2. Pp. 323–332.
19. Byskov E. The Calculation of Stress Intensity Element Method with Cracked Elements // International Journal of Fracture. 1970. Vol. 6. №2. Pp. 159–167.
20. Anderson G.P., Ruggles V.L., Stibor G.S. Use of Finite Element Computer Programs in Fracture Mechanics // International Journal of Fracture. 1971. Vol. 7. №1. Pp. 63–76.
21. Radaj D., Berto F., Lazzarin P. Local Fatigue Strength Parameters for Welded Joints Based on Strain Energy Density with Inclusion of Small-Size Notches // Engineering Fracture Mechanics. 2009. Vol. 76. Pp. 1109–1130.
22. Броек Д. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: Высшая школа, 1980. 367 с.
23. Бреев В.Л., Кархин В.А. Оценка влияния формы сварного шва на траекторию трещины и параметры разрушения методом граничных элементов // Автоматическая сварка. 1989. №1. С. 12–18.
24. Перельмутер М.Н. Анализ напряженного состояния в концевой области трещины на границе раздела материалов методом граничных элементов // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. №4. С. 415–426.
25. Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н., Махутов Н.А., Стадник М.М. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов: Справ. пособие. В 4-х т. Т. 4. Киев: Наукова думка, 1990. 680 с.
26. Хеллан К. Введение в механику разрушения: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 364 с.

** Татьяна Ивановна Летова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)552-63-03; эл. почта: cool.letova@yandex.ru*

© Летова Т.И., Петин С.В., 2013

Летова Т.И., Петин С.В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку

doi: 10.5862/MCE.38.7

Fatigue assessment of load-carrying welded cruciform joints

T.I. Letova;
S.V. Petinov,

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)552-63-03; e-mail: cool.letova@yandex.ru

Key words

welded joints with incomplete penetration; fatigue of welded joints; FE-based analysis of welded joints with cracks; stress intensity factors along the crack path; S-N curves for welded joints with incomplete penetration

Abstract

T-form and cruciform joints in which the stress flow is transferred via weld material are widely applied in welded structures. A special type of these joints is presented by fillet-welded joints with incomplete penetration used by economical and manufacturing reasons. At a certain width of the cavity it becomes an active notch which in current design rules is regarded as an initial crack. In that way, fatigue life of the joint is characterized by the crack extensions towards the outer surface of weld bead. Fatigue assessment of these joints requires reliable data on the stress intensity factors values along the crack path.

The results of systematic FEA-based calculations of stress intensity factors and respective S-N curves for the considered welded joints are presented. Main results obtained during this investigation can be used in solution of engineering tasks in reference to the fatigue assessment of welded cruciform joints with incomplete penetration.

References

1. Elber W. The Significance of Fatigue Crack Closure. *Damage Tolerance in Aircraft Structures. ASTM STP 486*. 1971. Pp. 230–242.
2. Petinov S.V. *Osnovy inzhenernykh raschetov ustalosti sudovykh konstruksii* [Basis of fatigue engineering design of ship structures]. Leningrad: Sudostroeniye, 1990. 224 p. (rus)
3. Karzov G.P., Margolin B.Z., Shvetsova V.A. *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical-mechanical modelling of process of deterioration]. Saint-Petersburg: Politekhnik, 1993. 391 p. (rus)
4. Jones J., Bennett C., Matamoros A., Rolfe S., Roddis K. Fighting Fatigue in Steel Bridges. *TR News, Transportation Research Board (TRB)*. 2008. Issue 259. Pp. 25–26.
5. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. *International Institute of Welding. IIW Document XIII-2151r1-07 / XV-1254r1-07*. Cambridge, Abington, 2007. 148 p.
6. *Det Norske Veritas. Fatigue Assessment of Offshore Steel Structures. Recommended Practice (RP-C203)*. Hovik, Norway. 2006.
7. Fricke W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structure. *International Institute of Welding. IIW-Documents XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08*. Cambridge, Abington, 2008. 38 p.
8. Leonov V.P., Vasilyev A.K. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2007. No.3. Pp. 187–203. (rus)
9. Ilyin A.V., Sadkin K.E. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2012. No.2. Pp. 161–176. (rus)
10. Petinov S.V., Afanasyeva I.M. *Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova*. 2010. No.53. Pp. 103–108. (rus)
11. Frank K.H., Fisher J.W. Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints. *Journal of the Structural Division ASCE*. 1979. Vol. 105. No.ST9. Pp. 1727–1741.
12. Khvostov A.E., Manzhula K.P. *Sbornik «Trudy SPbGPU» №494* [Digest “Transactions of SPbGPU” No.494]. Saint-Petersburg.: Izd-vo SPbGPU, 2005. Pp. 107–113. (rus)
13. Kim W.S., Kim D.H., Lee S.G., Lee Y.K. Fatigue Strength of Load-Carrying Box Fillet Weldment in Ship Structure. *Proceedings 8th International Symposium PRADS-2001, Shanghai*. September 2001. Vol. 2. Pp. 1161–1167.
14. Shlepetinskiy A.Yu., Manzhula K.P. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. No.4. Pp. 137–146. (rus)

Letova T.I., Petinov S.V. Fatigue assessment of load-carrying welded cruciform joints

15. Shlepetinskiy A.Yu., Manzhula K.P. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. No.3. Pp. 122–129. (rus)
16. Petinov S.V., Kim W.S., Paik Y.M. Assessment of Fatigue Strength of Weld Root in Ship Structure: An Approximate Procedure. *Ship and Offshore Structures Journal*. Woodhead Publishing. 2006. Vol. 1. No.1. Pp. 55–60.
17. EUROCODE 3: *Design of Steel Structures. Part 1-9: Fatigue*. BS EN 1993-1-9. 2005.
18. Watwood V.B. The Finite Element Method of Prediction of Crack Behavior. *Nuclear Engineering and Design*. 1969. Vol. 11. No.2. Pp. 323–332.
19. Byskov E. The Calculation of Stress Intensity Element Method with Cracked Elements. *International Journal of Fracture*. 1970. Vol. 6. No.2. Pp. 159–167.
20. Anderson G.P., Ruggles V.L., Stibor G.S. Use of Finite Element Computer Programs in Fracture Mechanics. *International Journal of Fracture*. 1971. Vol. 7. No.1. Pp. 63–76.
21. Radaj D., Berto F., Lazzarin P. Local Fatigue Strength Parameters for Welded Joints Based on Strain Energy Density with Inclusion of Small-Size Notches. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009. Vol. 76. Pp. 1109–1130.
22. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya: Per. s angl.* [Basis of fracture mechanics: translation from English]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980. 367 p. (rus)
23. Breyev V.L., Karkhin V.A. *The Paton Welding Journal*. 1989. No.1. Pp. 12–18. (rus)
24. Perelmuter M.N. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2012. Vol. 5. No.4. Pp. 415–426. (rus)
25. Romaniv O.N., Yarema S.I.A., Nikiforchin G.N., Makhutov N.A., Stadnik M.M. *Ustalost i tsiklicheskaya treshchinostoikost konstruktsionnykh materialov: Sprav. posobie. V 4-kh tomakh. T. 4*. [Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials: Handbook. In 4 volumes. Vol. 4]. Kiev: Naukova dumka, 1990. 680 p. (rus)
26. Hellan K. *Vvedeniye v mekhaniku razrusheniya: Per. s angl.* [Introduction to fracture mechanics: translation from English]. Moscow: Mir, 1988. 364 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 51–58