

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ШВА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Г. В. Ермолаев, канд. техн. наук, проф. НУК;
В. А. Мартыненко, канд. техн. наук;
И. В. Марунич, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Методом компьютерного моделирования исследовано напряженное состояние стыкового соединения при упругом нагружении растяжением. Показано, что за счет увеличения высоты выпуклости возможна компенсация некоторого снижения прочности наплавленного металла по сравнению с основным. Получена зависимость необходимой величины выпуклости от степени снижения прочности наплавленного металла.

Ключевые слова: стыковые соединения, концентрация напряжений, размеры выпуклости, статическое нагружение.

Анотація. Методом комп'ютерного моделювання досліджено напружений стан стикового з'єднання при пружному навантаженні розтягуванням. Показано, що за рахунок збільшення висоти опуклості можлива компенсація деякого зниження міцності наплавленого металу в порівнянні з основним. Одержано залежність необхідної величини опуклості від ступеня зниження міцності наплавленого металу.

Ключові слова: стикові з'єднання, концентрація напружень, розміри опуклості, статичне навантаження.

Abstract. By means of the computer-based simulation method the stress state of the butt joint under the elastic tensile loading has been studied. It is shown that the reduced durability of the weld metal compared to the base one can be compensated by increasing the convexity height. The dependence of the required convexity value on the degree of the weld metal durability reduction is obtained.

Keywords: butt joints, stress concentration, convexity sizes, static loading.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Классическая форма поперечного сечения стыкового соединения, выполненного дугowymi методами сварки, предполагает наличие выпуклости шва, размеры которой регламентируются всеми стандартами на сварные соединения [1–3]. Долгое время эту выпуклость называли усилением шва, так как предполагалось, что увеличение толщины металла на оси шва может компенсировать возможное снижение его прочности по сравнению с основным металлом.

С развитием и совершенствованием технологии сварки и сварочных материалов получение металла шва, равнопрочного основному, для большинства материалов, применяемых в сварных конструкциях, перестало быть проблемой. Соответственно и требования к размерам выпуклости шва в большинстве случаев остались чисто символическими. В ныне действующих межгосударственных стандартах (ГОСТ) высота выпуклости практически для всех толщин установлена в интервале от 1,5 до 4 мм при ширине от 5...6 до 60 мм [1, 2, 3].

Однако для некоторых материалов, например высокопрочных сталей, АМг сплавов, проблема получения швов, равнопрочных с основным металлом, остается и в настоящее время. Часто при невозможности получения равнопрочного металла шва приходится идти по пути снижения напряжений в нем за

счет увеличения высоты выпуклости. Но при этом возникает другая проблема – концентрация напряжений в точке перехода от основного металла к металлу шва. Возможно, поэтому в ныне действующих стандартах на сварочную терминологию термин «усиление» отнесен к недопустимым и заменен термином «выпуклость» [4, 5].

Анализ напряженного состояния методами теории упругости [8, 9] при нагружении растяжением показал, что при наличии выпуклости в зоне шва равномерность распределения нарушается, максимальные напряжения в зоне концентрации превышают средние в 1,6–2,0 и более раз. Вместе с тем экспериментальные исследования показали, что при нагружении статической нагрузкой и при достаточной пластичности металла такая концентрация не влияет на прочность сварного соединения в целом. С этой точки зрения использование выпуклости (усиления) для повышения несущей способности стыкового соединения при статическом нагружении вполне возможно.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Все известные к настоящему времени работы посвящены определению степени концентрации напряжений в месте перехода от наплавленного металла к основному [6, 7, 11] и влиянию концентрации на

прочность сварных соединений [10]. К сожалению, отсутствуют данные о напряженном состоянии наплавленного металла (металла шва) в целом и, как следствие, количественные зависимости, позволяющие определить необходимые размеры выпуклости, дающие возможность компенсировать снижение характеристик прочности металла шва. Поэтому тема настоящей работы актуальна.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – исследование методом компьютерного моделирования напряженного состояния стыкового соединения при нагружении его растяжением и на этой основе установление зависимости уровня и характера распределения напряжений от размеров выпуклости, выяснение возможности компенсации пониженной прочности металла шва увеличением размеров выпуклости.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10-й версии). Решались плоскодеформированные задачи с использованием конечных элементов (КЭ) PLANE 182. Рассматривалось соединение типа C25 толщиной $s = 30$ мм. Варьировались высота (a) и ширина (b) выпуклости (табл. 1). Форма выпуклости принималась в виде дуги.

Вследствие симметрии узла относительно горизонтальной (x) и вертикальной (y) осей КЭ модель строилась для четверти физической модели с соответствующим закреплением узлов на осях x и y (рис. 1). Размер вдоль оси x выбирался так, чтобы вблизи торцов распределение напряжений было равномерным, что исключало влияние этих участков на напряженное состояние в районе шва.

Таблица 1. Варианты исследованных моделей

Вариант	Высота выпуклости a , мм	Ширина выпуклости b , мм	Относительная высота a/b	Относительная ширина b/s	Полное сечение $s + 2a$	Коэффициент усиления $(s + 2a)/s$
1	2,5	23	0,109	0,77	35	1,17
2	4,5	43	0,105	1,43	39	1,30
3	7,5	73	0,103	2,43	45	1,50
4	2,5	25	0,100	0,83	35	1,17
5	4,5	45	0,100	1,5	39	1,30
6	7,5	75	0,100	2,5	45	1,50
7	2,5	29	0,086	0,97	35	1,17
8	4,5	49	0,092	1,63	39	1,30
9	7,5	79	0,095	2,63	45	1,50

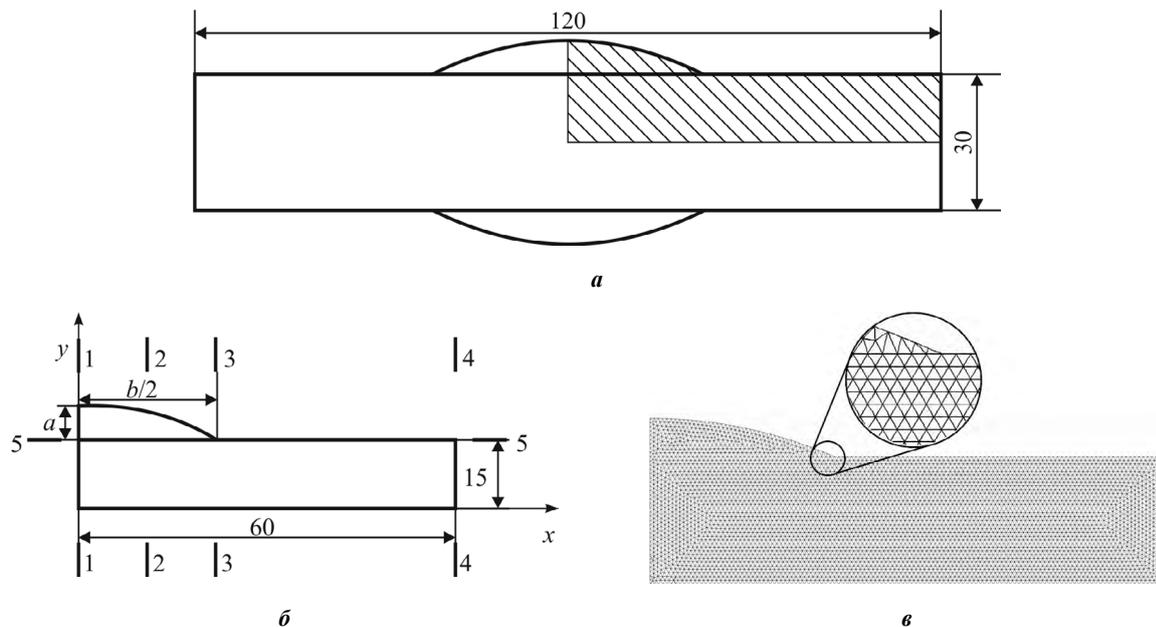


Рис. 1. Общий вид физической (а), расчетной (б) и конечно-элементной (в) моделей

Решалась упругая задача. Физико-механические свойства были приняты как для стали: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Модель загружалась равномерно распределенными по торцам растягивающими усилиями, создающими на них напряжения $\sigma_x = 100$ МПа.

Изучались поля продольных и поперечных, касательных и эквивалентных (по Мизесу) напряжений, а также их эпюры в сечениях по оси шва (1–1), на рас-

стоянии $b/4$ от оси (2–2), по кромке выпуклости (3–3), по торцу узла (4–4) и вдоль верхней кромки модели (5–5) (рис. 1, б).

Анализ полей (рис. 2) показал, что их характер при изменении размеров выпуклости практически не изменяется. За счет наличия выпуклости вблизи точки концентрации (переход от наплавленного металла к основному) появляются поперечные и касательные напряжения.

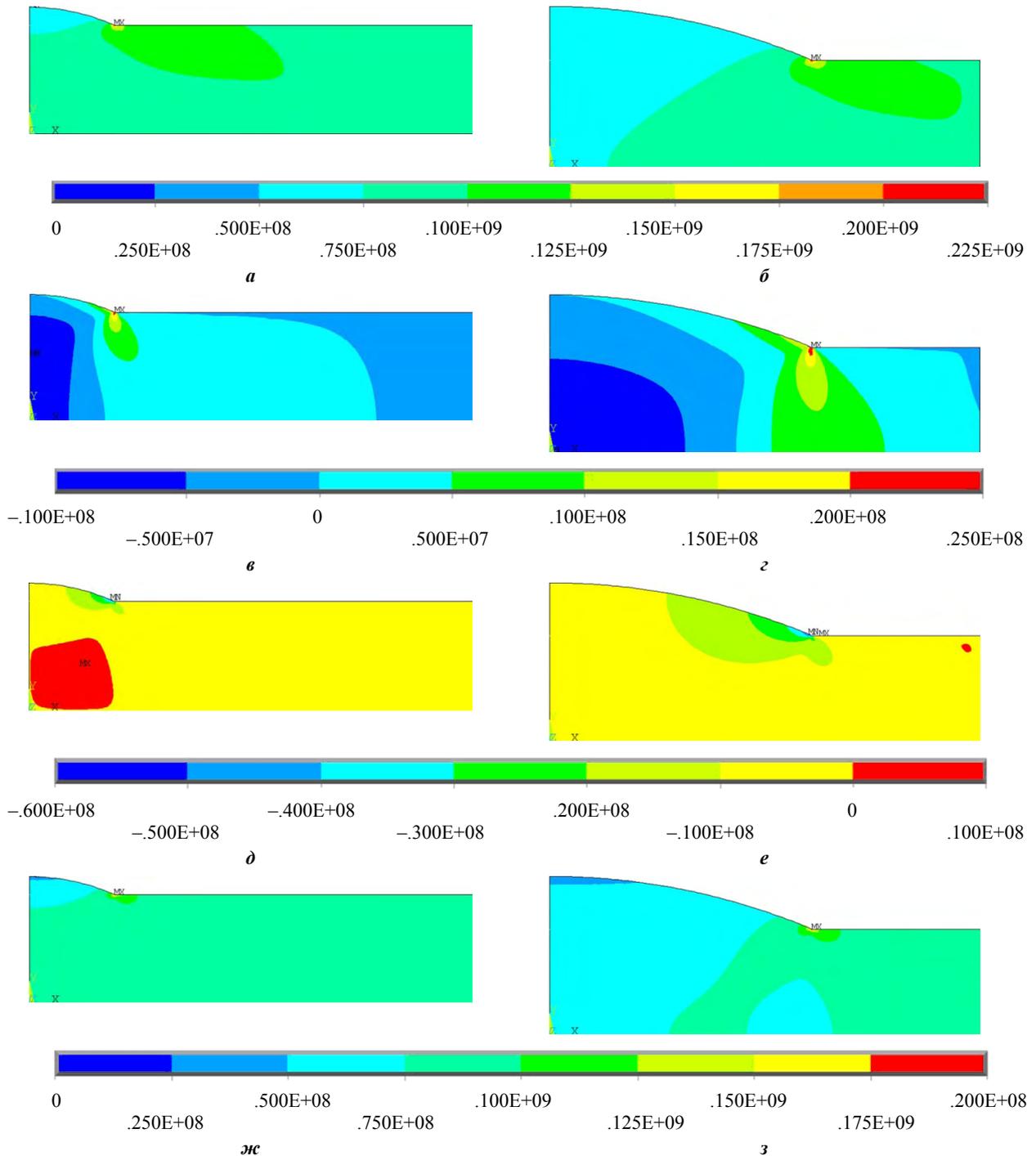


Рис. 2. Поля продольных (а, б), поперечных (в, з), касательных (д, е) и эквивалентных (ж, з) напряжений, варианты 1 (а, в, д, ж) и 3 (б, з, е, з)

Кроме того, небольшие поперечные и касательные напряжения возникают в центре шва (во внутренней части наплавленного металла).

Величина и характер распределения продольных и эквивалентных напряжений отличаются мало (см. рис. 2, 3). В сечении по оси шва (сечение 1–1) они максимальны в центре шва, здесь они превышают

средний уровень и постепенно уменьшаются по мере приближения к выпуклости. За счет появления поперечных и касательных напряжений эквивалентные несколько превышают продольные.

В точке концентрации напряжений (сечение 3–3) все напряжения резко возрастают (см. рис. 2, 3).

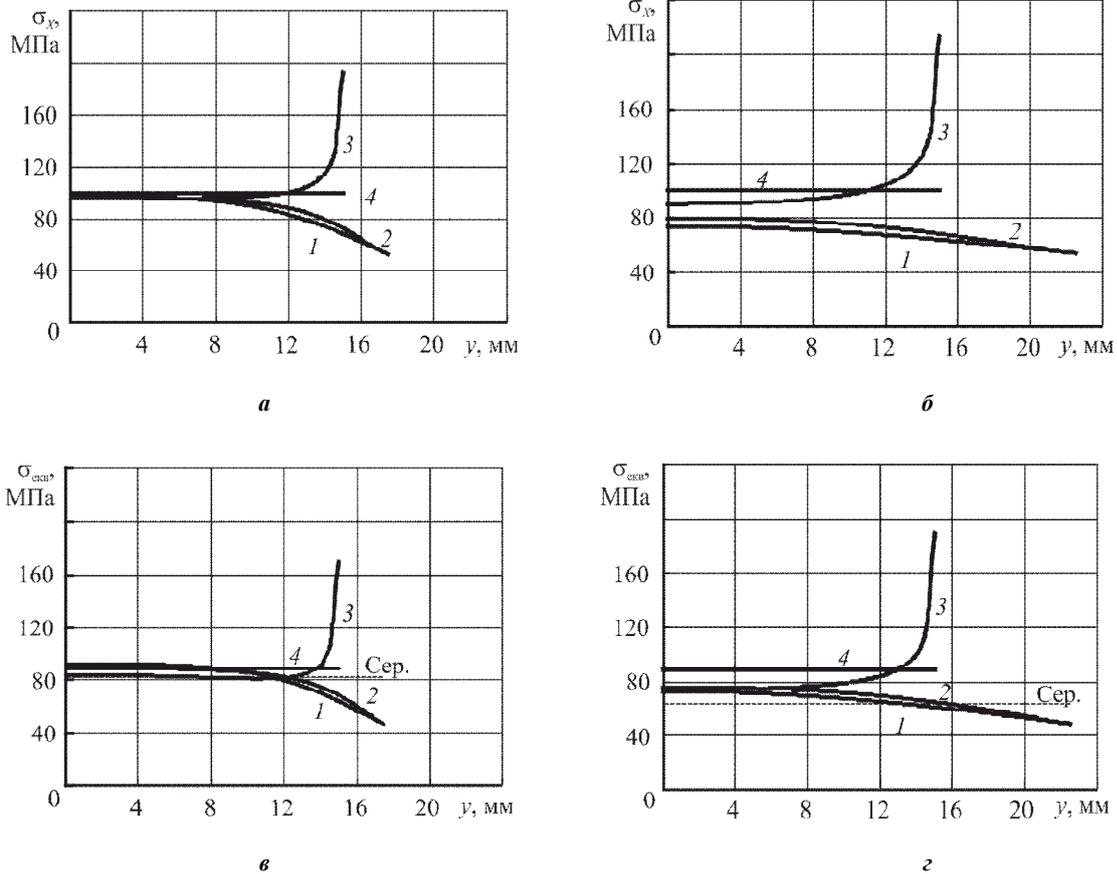


Рис. 3. Эпюры осевых (а, б) и эквивалентных (в, з) напряжений, варианты 1 (а, в) и 3 (б, з): 1 – сечение по оси шва; 2 – сечение на расстоянии b/4 от оси; 3 – сечение по кромке выпуклости; 4 – сечение по торцу узла

Для удобства количественной оценки уровня напряжений в табл. 2 и 3 приведены значения максимальных ($\sigma_{\max 1}, \sigma_{\max 2}, \sigma_{\max 3}$), минимальных ($\sigma_{\min 3}$) и средних ($\sigma_{\text{ср}1}, \sigma_{\text{ср}2}, \sigma_{\text{ср}3}$) продольных и эквивалентных напряжений в сечениях 1, 2 и 3. Там же приведены значения

коэффициентов, названных авторами коэффициентами перегрузки (степень превышения максимальных напряжений над средними), в первом и втором сечениях ($\sigma_{\max 1}/\sigma_{\text{ср}1}$ и $\sigma_{\max 2}/\sigma_{\text{ср}2}$) и коэффициенты концентрации напряжений в третьем сечении ($\sigma_{\max 3}/\sigma_{\text{ср}3}$).

Таблица 2. Характеристики напряженного состояния по продольным напряжениям в сечениях 1–1, 2–2, 3–3 в исследованных вариантах соединений

Вариант	$\sigma_{\max 1}$	$\sigma_{\text{ср}1}$	$\sigma_{\max 2}$	$\sigma_{\text{ср}2}$	$\sigma_{\min 3}$	$\sigma_{\max 3}$	$\sigma_{\text{ср}3}$	$\sigma_{\max 1}/\sigma_{\text{ср}1}$	$\sigma_{\max 2}/\sigma_{\text{ср}2}$	$\sigma_{\max 3}/\sigma_{\text{ср}3}$
1	97	86	97	89	96	193	100	1,13	1,09	1,9
2	88	77	90	81	92	208	100	1,14	1,11	2,1
3	74	67	80	72	90	213	100	1,10	1,11	2,1
4	97	86	96	89	95	189	100	1,13	1,08	1,9
5	87	77	89	81	92	204	100	1,13	1,10	2,0
6	73	67	80	73	90	211	100	1,09	1,10	2,1
7	96	86	95	89	95	182	100	1,12	1,07	1,8
8	86	77	88	81	92	197	100	1,12	1,09	2,0
9	73	67	79	73	91	206	100	1,09	1,08	2,1
Среднее								1,12	1,09	2,0

Как видно из таблиц, степень перегрузки мало изменяется при изменении размеров выпуклости. Когда коэффициент усиления изменяется от 1,17 до 1,5, коэффициент перегрузки остается по продольным напряжениям на уровне 1,11...1,14 в сечении 1-1 и 1,08...1,10 в сечении 2-2. По эквивалентным напряжениям эти интервалы составляют 1,13...1,16 и 1,08 и 1,10 соответственно. Как видим, изменение не превышает 2...3 %. Кроме того, сравнение сечений 1-1 и 2-2 показывает, что величина и характер распределения напряжений в них отличаются очень мало,

при этом коэффициент перегрузки несколько больше в сечении 1-1, поэтому в дальнейших расчетах будем рассматривать только сечение 1-1, а коэффициент перегрузки примем равным 1,145 по эквивалентным напряжениям.

В сечении 3-3 коэффициент концентрации напряжений ($\sigma_{\max3}/\sigma_{\text{cp}3}$) при изменении коэффициента усиления $((s + 2a)/s)$ от 1,17 до 1,50 увеличивается незначительно и остается на уровне около 2 (1,92...2,13 для продольных напряжений и 1,92...2,18 для эквивалентных).

Таблица 3. Характеристики напряженного состояния по эквивалентным напряжениям в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 в исследованных вариантах соединений

Вариант	$\sigma_{\max1}$	$\sigma_{\text{cp}1}$	$\sigma_{\max2}$	$\sigma_{\text{cp}2}$	$\sigma_{\min3}$	$\sigma_{\max3}$	$\sigma_{\text{cp}3}$	$\sigma_{\max1}/\sigma_{\text{cp}1}$	$\sigma_{\max2}/\sigma_{\text{cp}2}$	$\sigma_{\max3}/\sigma_{\text{cp}3}$
1	93	82	89	83	84	170	85	1,13	1,07	2
2	87	74	84	77	77	183	83	1,18	1,09	2,2
3	72	64	75	68	73	188	81	1,13	1,10	2,3
4	92	82	89	83	83	167	85	1,12	1,07	2,0
5	86	74	83	76	77	180	83	1,16	1,09	2,2
6	72	63	75	68	73	186	81	1,14	1,10	2,3
7	91	81	88	82	82	160	85	1,12	1,07	1,9
8	84	73	82	76	77	174	83	1,15	1,08	2,1
9	70	63	74	68	74	182	81	1,11	1,09	2,2
Среднее								1,14	1,08	2,13

Величина средних и максимальных продольных и эквивалентных напряжений в сечении 1-1 с увеличением высоты выпуклости уменьшается (рис. 4), что говорит о прин-

ципальной возможности использования выпуклости для компенсации снижения прочности металла шва и повышения прочности соединения при статических нагрузках.

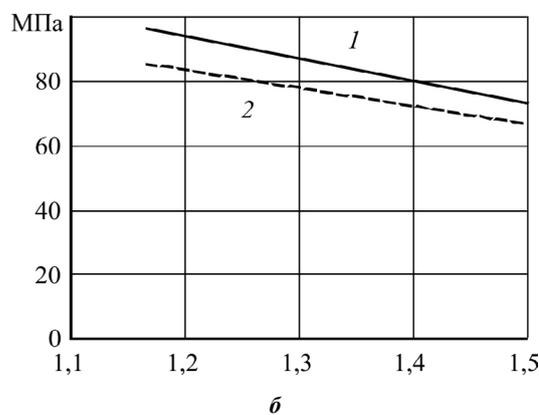
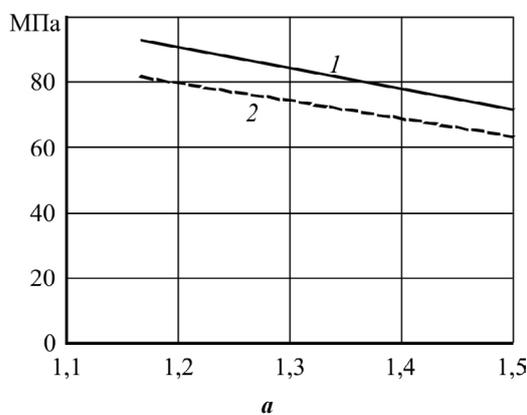


Рис. 4. Зависимость максимальных (1) и средних (2) продольных (а) и эквивалентных (б) напряжений в сечении 1-1 от коэффициента усиления шва $(s + 2a)/s$

Для получения зависимости необходимой высоты выпуклости от соотношения прочности металла шва и основного металла введем понятие «относительная прочность металла шва» (степень или коэффициент разупрочнения металла шва, коэффициент снижения прочности металла шва) $k_{\text{м.ш}} = \frac{[\sigma_{\text{м.ш}}]}{[\sigma_{\text{о.м}}]} = \frac{\sigma_{\text{Тм.ш}}}{\sigma_{\text{То.м}}}$ и воспользуемся условием равновесия узла

$$\sigma_{\text{cp}1}(s + 2h) = \sigma_{\text{о.м}4}s \quad (1)$$

и условием прочности для сечения 1-1

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_{\text{м.ш}}] \quad \text{или} \quad k_{\text{пер}1} \sigma_{\text{cp}1} \leq [\sigma_{\text{м.ш}}], \quad (2)$$

где $k_{\text{пер}1} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{cp}1}}$ – коэффициент перегрузки в сечении 1-1. Из уравнения равновесия (1)

$$\sigma_{\text{cp}1} = \sigma_{\text{о.м}} \frac{s}{s + 2h} \quad \text{или} \quad \sigma_{\text{cp}1} = \frac{\sigma_{\text{о.м}}}{k_{\text{yc}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{yc}} = \frac{s + 2h}{s} \geq 1$ – коэффициент усиления шва.

Очевидно, в предельно нагруженном состоянии уравнение (3) запишется в виде $\sigma_{ср1} = \frac{[\sigma_{о.м.}]}{k_{ус}}$.

Тогда условие прочности в сечении I-I (2) можно записать в виде $k_{пер1} \frac{[\sigma_{о.м.}]}{k_{ус}} \leq [\sigma_{м.ш}]$ или

$k_{пер1} \frac{[\sigma_{о.м.}]}{s + 2h} \leq [\sigma_{м.ш}]$, откуда после преобразований получим

$$h \geq 0,5s \left(\frac{k_{пер}}{k_{м.ш}} - 1 \right)$$

или, при $k_{пер} = 1,145$,

$$h \geq 0,5s \left(\frac{1,145}{k_{м.ш}} - 1 \right).$$

Таким образом, необходимая величина высоты выпуклости определяется степенью неравномерности распределения напряжений в металле шва ($k_{пер} \geq 1$) и снижения прочности металла шва по сравнению с основным металлом ($k_{м.ш} \leq 1$). Так, при $k_{пер} = 1,145$ и снижении прочности металла шва на 20 %, т. е. $k_{м.ш} = 0,8$, для толщины 30 мм необходимая ми-

нимальная высота выпуклости составит 6,5 мм, а при снижении прочности металла шва на 10 % – 4 мм.

ВЫВОДЫ

1. Выполненный методом компьютерного моделирования анализ напряженного состояния при растяжении стыкового соединения подтвердил ранее полученные аналитическими методами результаты по наличию концентрации напряжений в точке концентрации напряжений.

2. Установлено, что степень концентрации изменяется в пределах 1,8...2,1 по нормальным напряжениям и 1,9...2,3 – по эквивалентным при изменении размеров выпуклости в довольно широких пределах.

3. Наличие выпуклости несколько снижает уровень растягивающих и эквивалентных напряжений внутри металла шва, что дает возможность компенсировать снижение его прочности по сравнению с основным металлом, но это снижение не пропорционально увеличению площади сечения.

4. Получено выражение, позволяющее рассчитать необходимую величину выпуклости при известной степени снижения прочности наплавленного металла по сравнению с основным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1993. – 65 с.
- [2] ГОСТ 8713–79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 39 с.
- [3] ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 39 с.
- [4] ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий [Текст]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1995. – 57 с.
- [5] ДСТУ 3761.3–98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 3. Зварювання металів: з'єднання та шви. Технологія, матеріали та устаткування. Терміни та визначення [Текст]. – К. : Державний комітет стандартизації, метрології та сертифікації України, 1999. – 54 с.
- [6] Кархин, В. А. Влияние формы сварного шва на распределение напряжений при растяжении стыковых соединений большой толщины [Текст] / В. А. Кархин // Автоматическая сварка. – 1985. – № 9 (390). – С. 25–28.
- [7] Кархин, В. А. Влияние геометрических параметров стыковых, тавровых и крестовых соединений на коэффициент концентрации напряжений [Текст] / В. А. Кархин, В. И. Костылев, В. И. Стаканов // Автоматическая сварка. – 1988. – № 3 (420). – С. 6–11.
- [8] Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций [Текст] / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
- [9] Николаев, Г. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций [Текст] / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1971. – 760 с.
- [10] Пустовит, А. И. Влияние концентрации напряжений на прочность сварных соединений мартенситной стали [Текст] / А. И. Пустовит, С. А. Воронин, К. А. Ющенко // Автоматическая сварка. – 1987. – № 9 (414). – С. 1–3.
- [11] Стаканов, В. И. О расчете коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях [Текст] / В. И. Стаканов, В. И. Костылев, Ю. И. Рыбин // Автоматическая сварка. – 1987. – № 11 (416). – С. 19–23.

© Г. В. Єрмолаєв, В. О. Мартиненко, І. В. Маруніч

Надійшла до редколегії 28.09.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький

Статтю розміщено у Віснику НУК № 4, 2013