

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ВЫПУКЛОСТИ ШВА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Г. В. ЕРМОЛАЕВ, В. А. МАРТЫНЕНКО, И. В. МАРУНИЧ

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.

E-mail: welding@nuos.edu.ua

С целью выяснения возможности компенсации пониженной прочности металла шва увеличением размеров выпуклости стыкового соединения и установления зависимости необходимой высоты выпуклости от соотношения прочности шва и основного металла проведено исследование уровня и характера распределения напряжений в стыковых соединениях при нагружении их растяжением при различных размерах выпуклости. Исследования проводили методом компьютерного моделирования на стыковых соединениях видов С25 и С21. Варьировались высота и ширина выпуклости при постоянной толщине основного металла. Форма выпуклости принималась в виде дуги. Изучали поля всех составляющих напряжений, а также их эпюры в различных сечениях шва. Полученные величины коэффициентов концентрации (1,8...2,3) при изменении размеров выпуклости в довольно широких пределах подтвердили адекватность моделирования. Вместе с тем показано, что наличие выпуклости в симметричном соединении вида С25 несколько снижает уровень максимальных растягивающих и эквивалентных напряжений внутри металла шва, что дает возможность компенсировать снижение его прочности по сравнению с основным металлом, но это снижение непропорционально увеличению площади сечения. Получено выражение, позволяющее рассчитать необходимую величину выпуклости в соединении в С25 вида при известной степени снижения прочности наплавленного металла по сравнению с основным. Наличие выпуклостей и их размер в несимметричном соединении вида С21 практически не влияет на уровень максимальных эквивалентных напряжений в сечении по оси шва, поэтому компенсировать пониженную прочность металла шва увеличением выпуклостей в таком соединении невозможно. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании стыковых соединений материалов, в частности, для соединений высокопрочных сталей, выполняемых аустенитными материалами, для которых существует проблема обеспечения равнопрочности металла шва и основного металла. Библиогр. 12, табл. 4, рис. 7.

*Ключевые слова:* стыковые соединения, распределение напряжений, размеры выпуклости, статическое нагружение

Классическая форма поперечного сечения стыкового соединения, выполненного дуговыми 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 [1–3].

Однако для некоторых материалов, например, высокопрочных сталей, проблема получения швов, равнопрочных с основным металлом, остается актуальной и в настоящее время. При невозможности получения равнопрочного металла шва, например, при использовании сварочных материалов аустенитного класса, приходится идти по пути снижения допускаемой нагрузки или напряжений в нем за счет увеличения высоты выпуклости. Именно последнее предусматривается соответствующими техническими требованиями к сварным стыковым соединениям высокопрочных сталей, применяемых при постройке корпусов военных кораблей и подводных лодок. 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 соединения при нагружении растяжением методами теории упругости [6, 7] показал, что при наличии выпу-

Таблица 1. Варианты исследованных моделей соединений вида С25

Номер варианта	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	0,11	0,77	35	1,17
2	4,5	43	0,10	1,43	39	1,30
3	7,5	73	0,10	2,43	45	1,50
4	2,5	25	0,10	0,83	35	1,17
5	4,5	45	0,10	1,50	39	1,30
6	7,5	75	0,10	2,50	45	1,50
7	2,5	29	0,09	0,97	35	1,17
8	4,5	49	0,09	1,63	39	1,30
9	7,5	79	0,10	2,63	45	1,50
10	10,0	120	0,11	4,00	50	1,67

Таблица 2. Варианты исследованных моделей соединений вида С21

Номер варианта	Высота выпуклости $a$ , мм	Ширина выпуклости $b$ , мм	Относительная высота $a/b$	Относительная ширина $b/s$	Высота выпуклости $a_1$ , мм	Ширина выпуклости $b_1$ , мм	Относительная высота $a_1/b_1$	Относительная ширина $b_1/s$	Полное сечение $s+a+a_1$	Коэффициент усиления $(s+a+a_1)/s$
11	2,5	23	0,11	0,77	0,83	7,6	0,11	0,25	33	1,11
12	4,5	43	0,10	1,43	1,50	14,3	0,10	0,48	36	1,20
13	7,5	73	0,10	2,43	2,50	24,3	0,10	0,81	40	1,33
14	2,5	25	0,10	0,83	0,83	8,3	0,10	0,28	33	1,11
15	4,5	45	0,10	1,50	1,50	15,0	0,10	0,50	36	1,20
16	7,5	75	0,10	2,50	2,50	25,0	0,10	0,83	40	1,33
17	2,5	29	0,09	0,97	0,83	9,6	0,09	0,32	33	1,11
18	4,5	49	0,09	1,63	1,50	16,3	0,09	0,54	36	1,20
19	7,5	79	0,10	2,63	2,50	26,3	0,10	0,88	40	1,33

кности в зоне шва равномерность распределения нарушается, максимальные напряжения в точке концентрации (перехода от основного к наплавленному металлу) превышают средние от 1,6 до двух и более раз. Вместе с тем большинство элементов конструкций из высокопрочных сталей, например, обшивка корпусов надводных кораблей и подводных лодок, рассчитываются на прочность при статическом осевом нагружении. Как показали экспериментальные исследования, при нагружении статической нагрузкой и достаточной пластичности металла такая концентрация, также, как и остаточные сварочные напряжения, 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.

Известные к настоящему времени работы посвящены определению степени концентрации напряжений в месте перехода от наплавленного к основному металлу [8–10] и влиянию концентрации на прочность сварных соединений [11, 12]. К сожалению, практически отсутствуют данные о напряженном состоянии наплавленного металла (металла шва) в целом и, как следствие, количественные зависимости, позволяющие определить размеры выпуклости, необходимые для компенса-

ции снижения характеристик прочности металла шва. Поэтому тема настоящей работы актуальна.

Цель настоящей работы — установление зависимости уровня и характера распределения напряжений от размеров выпуклости, выяснение возможности компенсации пониженной прочности металла шва увеличением размеров выпуклости.

Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10 версии). Решали плоскодеформированные задачи с использованием конечных элементов (КЭ) PLANE 182. Исследовали стыковые соединения вида С25 (симметричные, с X-образной разделкой кромок) и С21 (несимметричные, с V-образной разделкой кромок) толщиной  $s = 30$  мм. Варьировались высота ( $a$ ) и ширина ( $b$ ) выпуклости (табл. 1). Форма выпуклости принималась в виде дуги.

Вследствие симметрии соединения С25 относительно горизонтальной  $x$  и вертикальной  $y$  осей КЭ модель строилась для верхней правой четверти физической модели с соответствующим закреплением узлов на осях  $x$  и  $y$  (рис. 1). В соединении С21, симметричном относительно только оси  $y$ , модель строилась для правой половины с соответствующим закреплением узлов на оси  $y$ .

Размер вдоль оси  $x$  выбирали так, чтобы вблизи торцов распределение напряжений было близ-

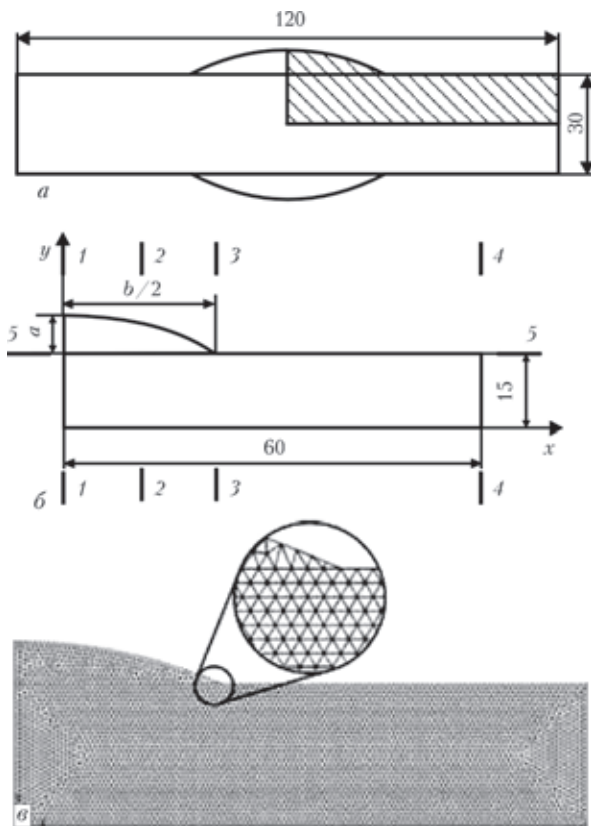


Рис. 1. Общий вид физической (а), расчетной (б) и конечно-элементной (в) моделей соединения вида С25 (описание 1–5 см. в тексте)

ким к равномерному, что исключало влияние этих участков на напряженное состояние в районе шва.

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

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

Изучали поля продольных и поперечных, касательных и эквивалентных (по Мизесу) напряжений, а также их эпюры в сечениях по оси шва (1), на расстоянии  $b/4$  или  $b_1/2$  от оси  $y$  в соединениях С25 и С21 соответственно (2), по кромке выпуклости (3), по торцу узла (4) и вдоль верхней и нижней кромок моделей (5 и 6) (рис. 1, б и 2, б).

Анализ полей (рис. 3 и 4) показал, что их характер при изменении размеров выпуклостей в целом изменяется мало. Вблизи точек концентрации (переход от наплавленного металла к основному) появляются поперечные и касательные напряжения. Кроме того, небольшие поперечные и касательные напряжения возникают во внутренней части наплавленного металла. Металл в выпуклостях заметно разгружается.

Характер распределения продольных и эквивалентных напряжений отличается мало. На оси шва (сечение 1) соединения С25 эти напряжения максимальны в средней части, где они несколько превышают средний уровень, и постепенно

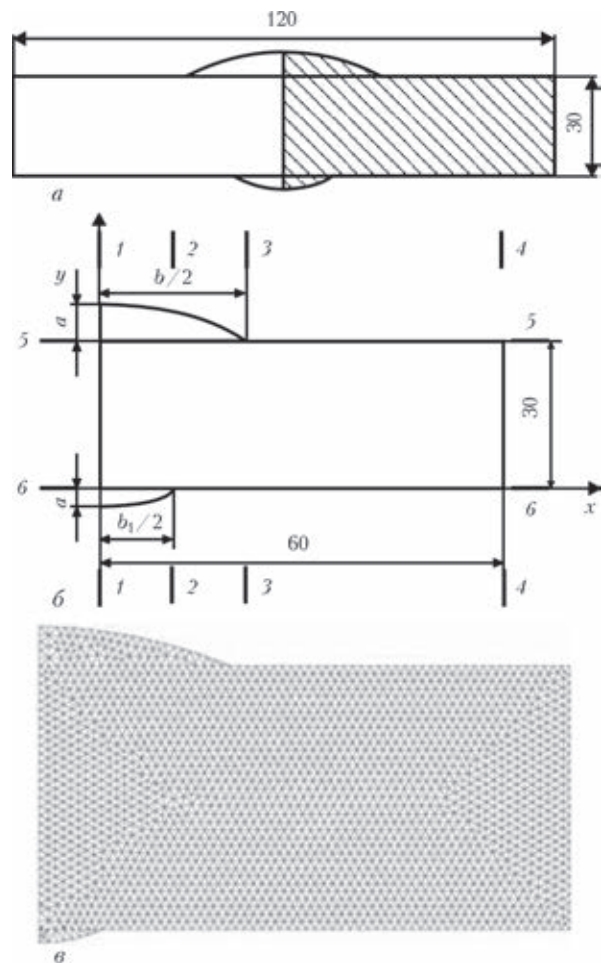


Рис. 2. Общий вид физической (а), расчетной (б) и конечно-элементной (в) моделей соединения С21 (описание 1–6 см. в тексте)

уменьшаются по мере приближения к выпуклостям (рис. 5). За счет появления поперечных и касательных напряжений уровень эквивалентных несколько отличается от продольных.

На расстоянии четверти ширины выпуклости (сечение 2) характер распределения и уровень напряжений сохраняется. В точке концентрации напряжений (сечение 3) все напряжения резко возрастают. Размеры выпуклости мало влияют на характер эпюр напряжений, несколько изменяя их уровень (рис. 5).

В соединении С21 характер распределения напряжений в верхней половине соединения в целом сохраняется, но уровень их несколько уменьшается в результате изгиба модели вследствие ее асимметрии относительно продольной оси (рис. 6). В нижней части при этом изгиб уменьшает степень разгрузки в области выпуклости (сечение 1) и увеличивает степень концентрации в точке перехода от основного к наплавленному металлу (сечение 2).

Для удобства количественной оценки уровня напряжений в табл. 3 и 4 приведены значения максимальных ( $\sigma_{\max 1}$ ,  $\sigma_{\max 2}$ ,  $\sigma_{\max 3}$ ), минимальных ( $\sigma_{\min 3}$ ) и средних ( $\sigma_{cp 1}$ ,  $\sigma_{cp 2}$ ,  $\sigma_{cp 3}$ ) эквивалентных

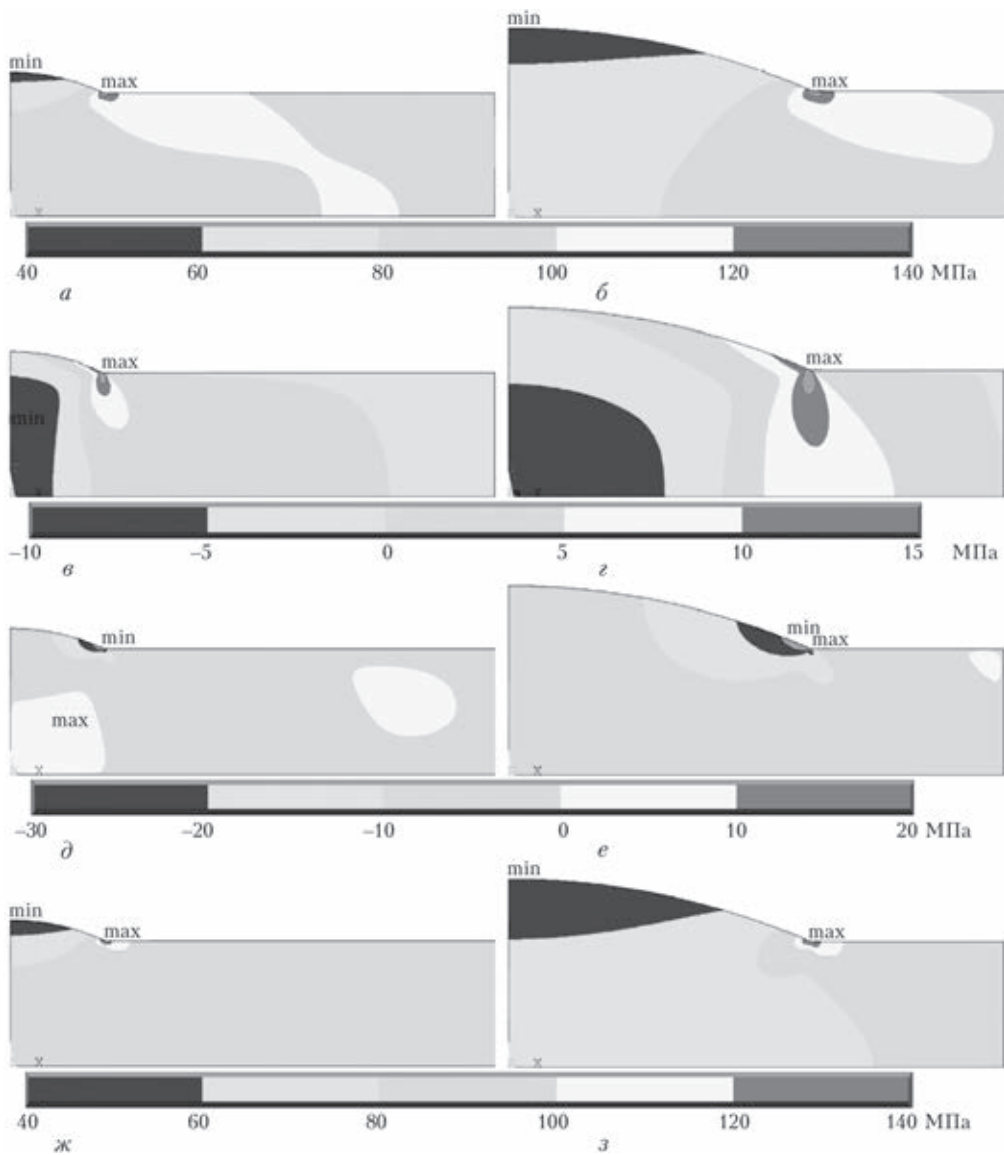


Рис. 3. Поля продольных (*а, б*), поперечных (*в, г*), касательных (*д, е*) и эквивалентных (*ж, з*) напряжений (варианты 1 (*а, в, д, ж*) и 3 (*б, г, е, з*))

напряжений в сечениях 1–3. Там же приведены значения коэффициентов перегрузки (степень превышения максимальных напряжений над средними в сечении) 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 сечениях 3 ( $\sigma_{\max 3} / \sigma_{\text{ср}3}$ ) и 2 в соединении С21 ( $\sigma_{\max 2} / \sigma_{\text{ср}2}$ ).

Как видно из таблиц, степень перегрузки мало изменяется при изменении размеров выпуклости.

В соединении С25 при изменении коэффициента усиления (увеличения толщины в зоне шва) от 1,17 до 1,5 (табл. 1) коэффициент перегрузки по эквивалентным напряжениям остается на уровне 1,13...1,18 в сечении 1 и 1,07...1,10 в сечении 2. Как видим, изменение не превышает 3...5%. Кроме того, сравнение сечений 1 и 2 показывает, что величина и характер распределения напряжений в них отличаются очень мало, при этом коэффициент перегрузки несколько больше в сечении 1, поэтому в дальнейших расчетах будем рассма-

тривать только сечение 1, а коэффициент перегрузки примем равным 1,145 по эквивалентным напряжениям.

В сечении 3 коэффициент концентрации напряжений ( $\sigma_{\max 3} / \sigma_{\text{ср}3}$ ) при изменении коэффициента усиления шва  $k_{yc} = (s + 2a) / s$  от 1,17 до 1,50 увеличивается незначительно и остается на уровне около 2 (1,92...2,18).

В соединении С21 при изменении коэффициента усиления в исследованных вариантах в пределах 1,11...1,33 (табл. 2) коэффициент перегрузки по эквивалентным напряжениям в сечении 1 изменяется пропорционально от 1,14 до 1,34, т. е. остается практически равным коэффициенту усиления.

В сечении 2 коэффициент концентрации с ростом коэффициента усиления увеличивается от 1,43 до 2,39, а в сечении 3 практически не изменяется, оставаясь в пределах 1,59...1,70.

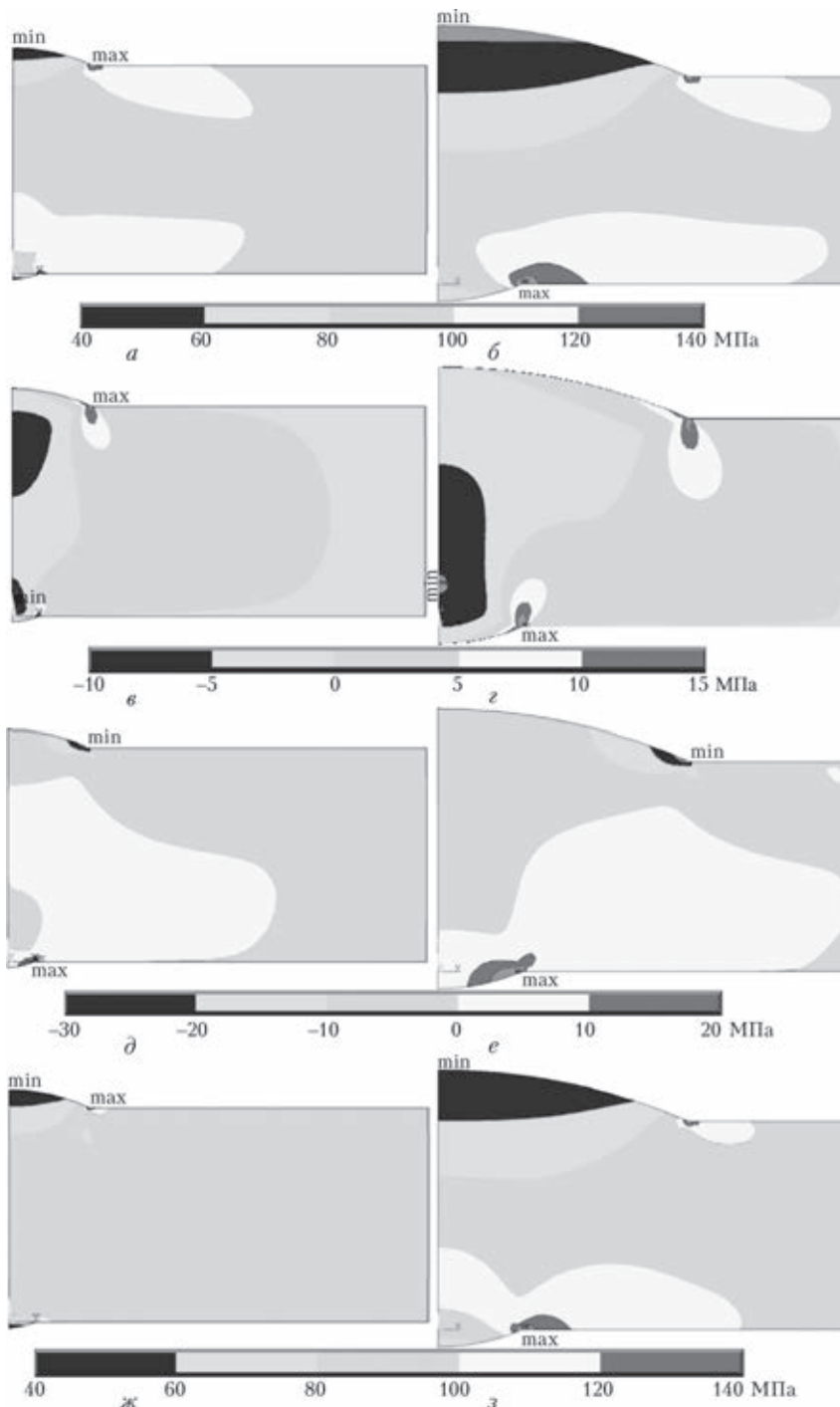


Рис. 4. Поля продольных (а, б), поперечных (в, г), касательных (д, е) и эквивалентных (ж, з) напряжений (варианты 11 (а, в, д, ж) и 13 (б, г, е, з))

В соединении С25 величина средних и максимальных эквивалентных напряжений в сечении I с увеличением высоты выпуклости уменьшается (рис. 7, а), что свидетельствует о принципиальной возможности использования выпуклости для компенсации снижения прочности металла шва и повышения прочности такого соединения при статических нагрузках.

В соединении С21 уровень максимальных напряжений в сечении I практически не зависит от высоты выпуклостей, хотя средние напряжения уменьшаются (рис. 7, б), т. е. в соединении это-

го типа увеличение даже статической прочности за счет величины выпуклостей практически невозможно.

Для получения зависимости необходимой высоты выпуклости в соединении С25 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)  $K_{\text{мш}} = \frac{\sigma_{\text{мш}}}{\sigma_{\text{ом}}} = \frac{\sigma_{\text{Гмш}}}{\sigma_{\text{Гом}}}$  и воспользуемся условием равновесия узла

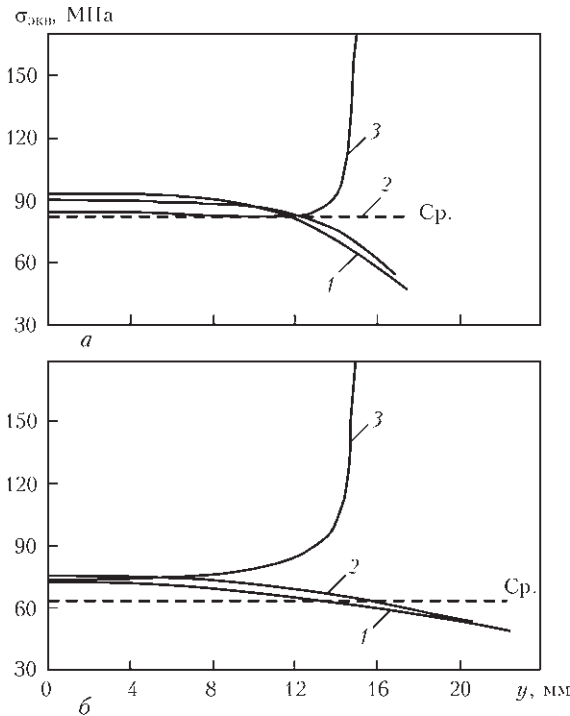


Рис. 5. Эпюры эквивалентных напряжений в сечениях 1–3 (варианты 1 (а) и 3 (б))

$$\sigma_{cp1}(s+2a) = \sigma_{ом4}s \quad (1)$$

и условием прочности для сечения 1

$$\sigma_{max1} \leq [\sigma_{мш}] \text{ или } k_{пер1} \sigma_{cp1} \leq [\sigma_{мш}], \quad (2)$$

где  $k_{пер1} = \sigma_{max1} / \sigma_{cp}$  — коэффициент перегрузки в сечении 1;  $[\sigma_{мш}]$  и  $\sigma_{тмш}$  — допускаемые напряжения и предел текучести металла шва соответственно;  $[\sigma_{ом}]$  и  $\sigma_{том}$  — допускаемые напряжения и предел текучести основного металла соответственно.

Из уравнения равновесия (1)

$$\sigma_{cp1} = \sigma_{ом} \frac{s}{s+2a} \text{ или } \sigma_{cp1} = \sigma_{ом} / k_{ус}, \quad (3)$$

где  $k_{ус} = \frac{s+2a}{s} \geq 1$  — коэффициент усиления шва.

Очевидно, в предельно нагруженном состоянии уравнение (3) запишется в виде  $\sigma_{cp1} = [\sigma_{ом}] / k_{ус}$ .

Тогда условие прочности в сечении 1 (2) можно записать в виде

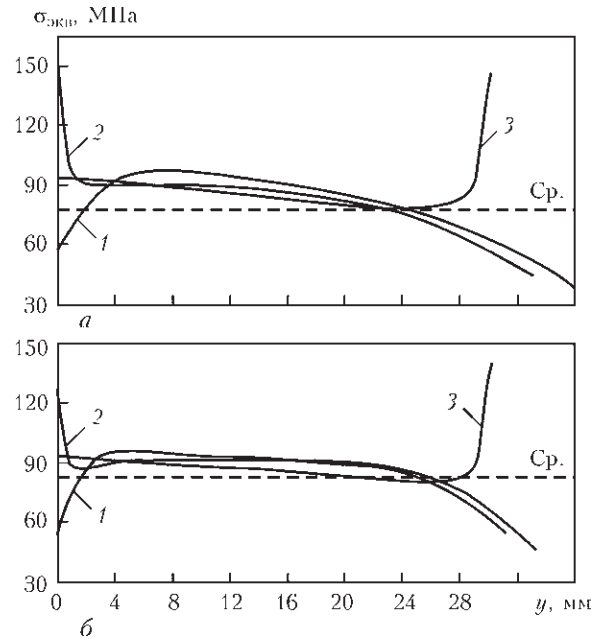


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений в сечениях 1–3 (варианты 11 (а) и 13 (б))

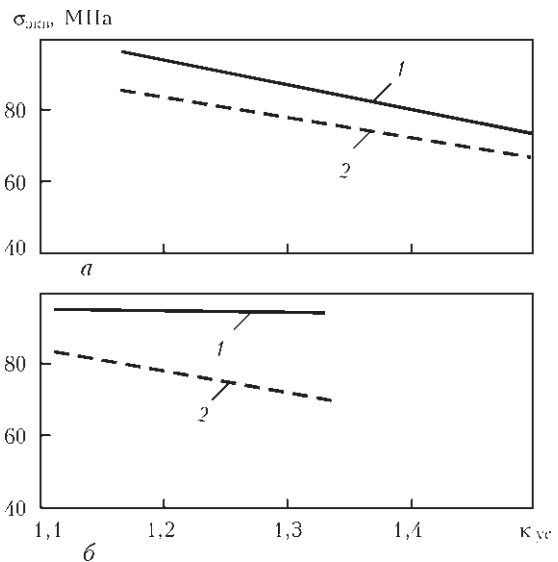


Рис. 7. Зависимость максимальных (1) и средних (2) эквивалентных напряжений в сечении 1 соединений С25 (а) и С21 (б) от коэффициента усиления шва

Т а б л и ц а 3. Эквивалентные напряжения в сечениях 1–3 в исследованных вариантах соединений вида С25

Номер варианта	$\sigma_{max1}$	$\sigma_{cp1}$	$\sigma_{max2}$	$\sigma_{cp2}$	$\sigma_{min3}$	$\sigma_{max3}$	$\sigma_{cp3}$	$\sigma_{max1}/\sigma_{cp1}$	$\sigma_{max2}/\sigma_{cp2}$	$\sigma_{max3}/\sigma_{cp3}$
1	93	82	89	83	84	170	85	1,13	1,07	2,00
2	87	74	84	77	77	183	83	1,18	1,09	2,20
3	72	64	75	68	73	188	81	1,13	1,10	2,30
4	92	82	89	83	83	167	85	1,12	1,07	2,00
5	86	74	83	76	77	180	83	1,16	1,09	2,20
6	72	63	75	68	73	186	81	1,14	1,10	2,30
7	91	81	88	82	82	160	85	1,12	1,07	1,90
8	84	73	82	76	77	174	83	1,15	1,08	2,10
9	70	63	74	68	74	182	81	1,11	1,09	2,20
Среднее значение для всех вариантов	-	-	-	-	-	-	-	1,14	1,08	2,13

Таблица 4. Эквивалентные напряжения в сечениях 1–3 в исследованных вариантах соединений вида С21

Номер варианта	$\sigma_{\max 1}$	$\sigma_{\text{cp}1}$	$\sigma_{\max 2}$	$\sigma_{\text{cp}2}$	$\sigma_{\min 3}$	$\sigma_{\max 3}$	$\sigma_{\text{cp}3}$	$\sigma_{\max 1}/\sigma_{\text{cp}1}$	$\sigma_{\max 2}/\sigma_{\text{cp}2}$	$\sigma_{\max 3}/\sigma_{\text{cp}3}$
1	95	83	123	86	80	141	88	1,14	1,43	1,60
2	97	78	150	81	78	146	87	1,24	1,85	1,68
3	95	71	177	74	77	148	87	1,34	2,39	1,70
4	95	83	126	86	80	140	88	1,14	1,47	1,59
5	97	78	150	81	78	146	87	1,24	1,85	1,68
6	94	71	176	74	77	147	87	1,32	2,38	1,69
7	95	83	126	86	81	136	88	1,14	1,47	1,55
8	96	78	150	81	78	143	87	1,23	1,85	1,64
9	94	70	175	73	77	145	87	1,34	2,40	1,67
Среднее значение для всех вариантов	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,64

$$k_{\text{пер}1} \frac{[\sigma_{\text{ом}}]}{k_{\text{ус}}} \leq [\sigma_{\text{мш}}] \text{ или } k_{\text{пер}1} \frac{[\sigma_{\text{ом}}]}{s + 2a} \leq [\sigma_{\text{мш}}],$$

откуда после преобразований получим

$$a \geq 0,5s \left( \frac{k_{\text{пер}}}{k_{\text{мш}}} - 1 \right), \quad (4)$$

или при  $k_{\text{пер}} = 1,145$   $a \geq 0,5s \left( \frac{1,145}{k_{\text{мш}}} - 1 \right)$ .

Таким образом, необходимая величина высоты выпуклости определяется степенью неравномерности распределения напряжений в металле шва ( $k_{\text{пер}} \geq 1$ ) и снижения прочности металла шва по сравнению с основным металлом ( $k_{\text{мш}} \leq 1$ ). Так, при  $k_{\text{пер}} = 1,145$  и снижении прочности металла шва на 20 %, т. е.  $k_{\text{мш}} = 0,8$  для толщины 30 мм, необходимая минимальная высота выпуклости составит 6,5 мм, а при снижении прочности металла шва на 10 % — 4 мм.

### Выводы

1. При изменении размеров выпуклости в довольно широких пределах коэффициент концентрации эквивалентных напряжений в точках перехода от основного к наплавленному металлу изменяется в пределах 1,9...2,3 в соединении С25, 1,55...1,7 с наружной стороны и 1,45...2,40 с обратной стороны соединения С21.

2. Наличие выпуклости в симметричном соединении С25 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.

3. Получено выражение, позволяющее рассчитать необходимую величину выпуклости в соединении С25 при известной степени снижения

прочности наплавленного металла по сравнению с основным.

4. Наличие выпуклостей и их размер в несимметричном соединении С21 практически не влияет на уровень максимальных эквивалентных напряжений в сечении по оси шва, поэтому компенсировать пониженную прочность металла шва увеличением выпуклостей невозможно.

- ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1993. – 65 с.
- ГОСТ 8713–79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 39 с.
- ГОСТ14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 39 с.
- ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1995. – 57 с.
- ДСТУ 3761.3–98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 3. Зварювання металів: з'єднання та шви, технологія, матеріали та устаткування. Терміни та визначення. – Київ: Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України, 1999. – 54 с.
- Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
- Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. – М.: Высш. шк., 1971. – 760 с.
- Кархин В. А. Влияние формы сварного шва на распределение напряжений при растяжении стыковых соединений большой толщины // Автомат. сварка. – 1985. – №9(390). – С. 25–28.
- Стаканов В. И., Костылев В. И., Рыбин Ю. И. О расчете коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях // Там же. – 1987. – №11(416). – С. 19–23.
- Кархин В. А., Костылев В. И., Стаканов В. И. Влияние геометрических параметров стыковых, тавровых и крестовых соединений на коэффициент концентрации напряжений // Там же. – 1988. – №3(420). – С. 6–11.
- Пустовит А. И., Воронин С. А., Ющенко К. А. Влияние концентрации напряжений на прочность сварных соединений мартенситной стали // Там же. – 1987. – №9(414). – С. 1–3.
- Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 620 с.

Поступила в редакцию 30.05.2014