

Шелег В.К., Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А., Синица А.Н., Цыркунов В.А.

**НОВЫЕ ЭКОНОМИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
ТАВРОВЫХ ОДНОСТОРОННИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

ООО «ВЕБЕР КОМЕХАНИКС», г. Москва

Проведен анализ напряженного состояния односторонних тавровых соединений типа Т6 и Т7. Установлено, что для обеспечения максимальной несущей способности соединение типа Т6 не должно иметь выступающей части у сварного шва, соединяющего стенку с поясом. Предложена конструкция таврового двухшовного соединения с составным поясом. Это позволит производить сварку с хорошим доступом к вершине шва при малых углах скоса кромки. Приведено условие, при котором обеспечивается объем наплавленного металла, меньший, чем стандартное соединение типа Т6. Изложены рекомендации по ограничению горизонтального катета подварочного шва. Его величина должна быть равна горизонтальному катету выступающей части основного шва.

В связи с ростом требований по экономии материальных и трудовых ресурсов в сварочном производстве возрастает актуальность задачи конструирования и изготовления экономичных сварных соединений. Большую роль здесь должно сыграть совершенствование действующих стандартов, определяющих конструктивные элементы сварных соединений и их размеры. Расход ресурсов на изготовление сварной конструкции напрямую связан с объемом наплавленного металла, по которому можно судить о затратах [1]. Это обусловлено необходимостью использования присадочных материалов (электроды, сварочная проволока), электроэнергии на их нагрев и плавление, а также трудовых затрат. Тавровые сварные соединения находят широкое применение в технике изготовления металлических конструкций. Все их разновидности по характеру выполняемых швов можно разделить на односторонние и двусторонние. В ряде случаев применение односторонних тавровых соединений обеспечивает более высокие технико-экономические показатели производства по сравнению с техническими решениями, основанными на соединениях одностороннего типа [2]. Действующими стандартами, в частности, ГОСТ 14771-76, предусмотрено три типа односторонних тавровых соединений: без подготовки свариваемых кромок (соединение Т1), со скосом кромки под углом 45° (соединение Т6), а также аналогичное ему соединение Т7, имеющее вспомогательный подварочный шов с другой стороны соединения. Важной особенностью всех типов односторонних тавровых соединений является их асимметрия, которая в настоящее время не учитывается при оценке несущей способности и которая может оказать заметное отрицательное влияние на величину эксплуатационных напряжений в соединении [3-8]. Недооценка этого фактора может привести к недостаточно обоснованным рекомендациям [9] по конструированию и технологии изготовления тавровых сварных соединений с односторонними швами.

Ввиду важности данного вопроса рассмотрим особенности напряженно-деформированного состояния односторонних тавровых соединений. Асимметрию соединений Т1 и Т6 с исчерпывающей полнотой можно охарактеризовать размером горизонтального катета выступающей наружу части сварного шва (размер k на рисунке 1), а также величиной непровара a . Если к стенке соединения при закрепленной полке при-



ложить полезную нагрузку в виде силы P (см. рисунок 1), то реакция связи окажется смещенной по отношению к центру тяжести сечения на величину $e = \frac{k+a}{2}$.

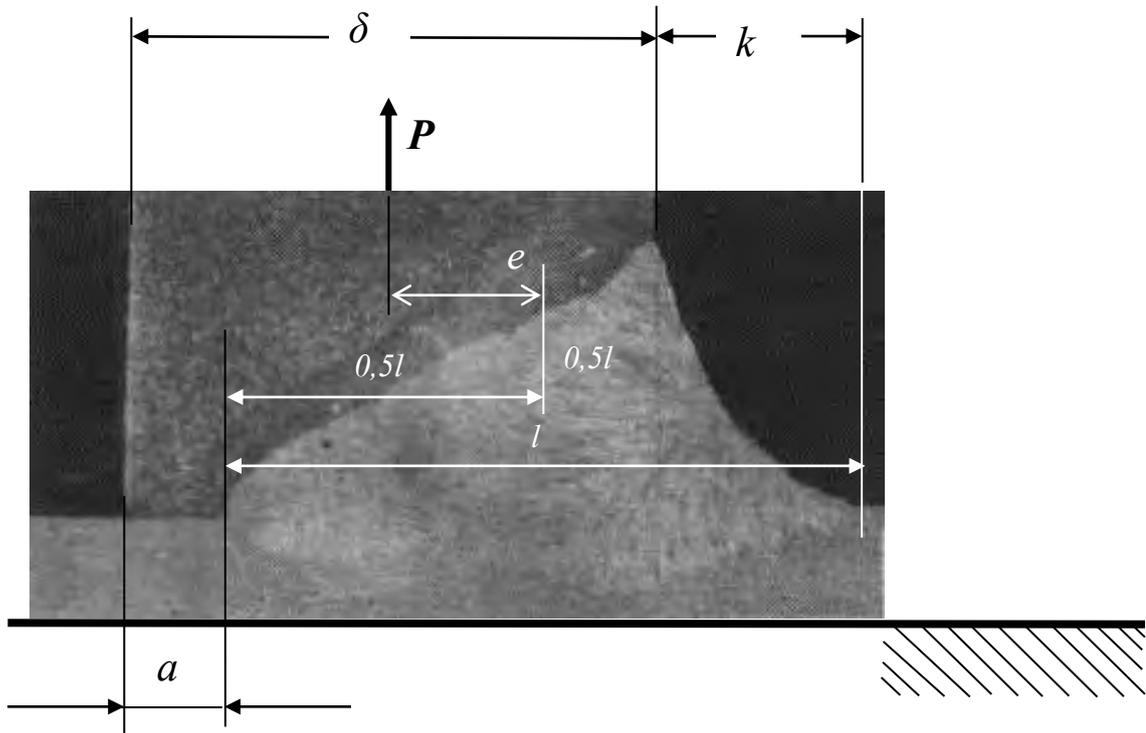


Рис. 1. Макроструктура одностороннего таврового сварного соединения, выполненного с углом скоса кромки величиной 30° [9] и схема его нагружения

Соответственно, в соединении создается дополнительный нагружающий момент величиной $M = Pe$, который приводит к образованию растягивающих напряжений в корне шва величиной $\sigma_M = M/W$, где $W = \frac{bl^2}{6}$ - момент сопротивления сечения, а b - ширина соединяемых пластин.

Суммируя напряжения у корня шва, получим следующее выражение:

$$\sigma_{A1} = \sigma_p + \sigma_M = \frac{P}{bl} + \frac{M}{W} = \sigma_{np} \frac{\delta}{\delta + k - a} + \frac{6b\delta\sigma_{np}(k+a)}{2b(\delta+k-a)^2}, \quad (1)$$

где σ_{np} - приложенное напряжение; $P = b\delta\sigma_{np}$; σ_{np} - толщина пластины

Величину непровара и горизонтального катета шва удобно выражать в долях от толщины пластины, т.е., $a = \beta\delta$, $k = \psi\delta$;

Тогда, подставив их в уравнение 1, получим выражение для максимальных суммарных напряжений в виде:

$$\sigma_{max} = \sigma_{np} \frac{1}{1+\psi-\beta} + \sigma_{np} \frac{3(\beta+\psi)}{1+\psi-\beta} = \sigma_{np}\varphi, \quad (2)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{1 + \psi - \beta} + \frac{3(\beta + \psi)}{(1 + \psi - \beta)^2} \quad (3)$$

Таким образом, по значению коэффициента φ можно судить о величине максимальных напряжений в асимметричном одностороннем тавровом соединении. Чтобы оценить влияние характерных размеров соединения были проведены расчеты по формуле (3), результаты которых сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Влияние размеров таврового соединения
на величину максимальных суммарных напряжений

Значения коэффициента ψ	Значения коэффициента φ при величине β		
	0	0,05	0,1
0,1	1,16	1,36	1,6
0,2	1,25	1,437	1,654
0,3	1,3	1,472	1,667
0,4	1,326	1,482	1,657
0,5	1,33	1,474	1,633
0,6	1,328	1,457	1,6
0,7	1,315	1,432	1,562
0,8	1,296	1,404	1,522
0,9	1,274	1,373	1,481
1,0	1,24	1,34	1,44

Приведенные в таблице 1 данные свидетельствуют о значительном влиянии факторов, определяющих асимметрию таврового сварного соединения, на величину суммарных напряжений. Дополнительные напряжения, связанные с асимметрией, не только имеют значительную величину, но и действуют в месте наибольшей концентрации напряжений. Такая комбинация неблагоприятных факторов способствует резкому снижению работоспособности соединения, особенно в условиях циклического нагружения. Полученные результаты показывают принципиальную невозможность компенсировать непровар увеличением размера выступающей части сварного шва. Например, при 5% непроваре и небольшом значении $\psi = 0,1$ увеличение горизонтального катета до $\psi = 0,4$ приведет только к увеличению суммарных напряжений (коэффициент φ увеличится примерно на 9%). Данные таблицы 1 показывают, что наиболее эффективным направлением повышения экономичности односторонних тавровых сварных соединений является уменьшение размера выступающей части сварного шва. И хотя при этом общая нагрузка на прикорневую область снижается незначительно (на 15% в соединениях, не имеющих непровара), но одновременно здесь может быть обеспечено заметное уменьшение объема сварного шва.

Из-за наличия выступающей части сварного шва продольная сила P (рисунок 2) оказывается смещенной не только в крайнем сечении AB , но и в любом другом сечении 1 – 1 на участке, имеющем выступающую часть. Тогда максимальное значение суммарных нормальных напряжений будет иметь место в крайнем волокне присоединяемой пластины (т.е., в точке D на рисунке 2). Соответственно, при устранении или уменьшении асимметрии в конструкции соединения создаются условия для уменьшения максимального напряжения в основном металле, и, в конечном итоге, уменьшения

толщины δ без снижения несущей способности. Следует отметить, что при уменьшении толщины улучшаются условия для полного проплавления стенки и соответствующего уменьшения непровара a (рисунок 1). Это, в свою очередь, согласно результату (3), способствует еще большему снижению уровня суммарных напряжений в соединении.

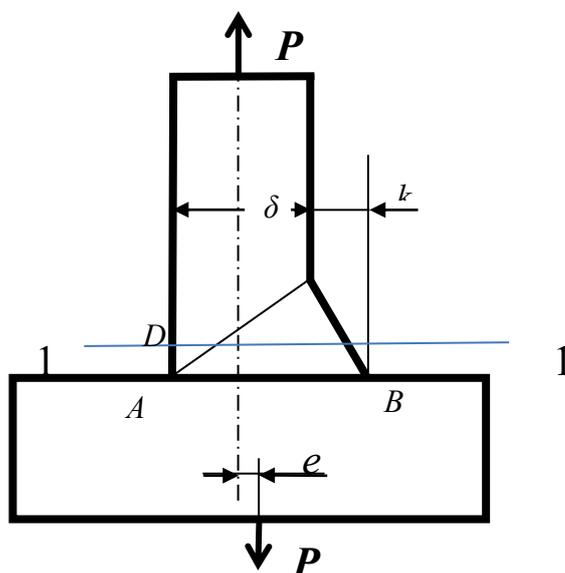


Рис. 2. Схема нагружения одностороннего таврового сварного соединения с полным проплавлением

Таким образом, наиболее перспективным направлением совершенствования конструкции одностороннего таврового соединения является стремление к техническим решениям с более симметричной его конфигурацией. Наибольший эффект может быть достигнут за счет уменьшения размеров выступающей части шва в соединении Т6, т.к. кроме повышения несущей способности это обеспечивает и более высокую экономичность. Максимальная технико-экономическая эффективность обеспечивается при *полном* устранении выступающей части и соответственно абсолютной симметричности соединения. Справедливость этого вывода подтверждают результаты сравнительного конечно-элементного анализа напряженного состояния тавровых соединений с наличием выступающей части (рисунок 3а) и без нее (рисунок 3б).

В соединении без выступающей части уровень максимальных нормальных напряжений снизился с 1,964 МПа до значения 1,33 МПа, т.е., в 1,47 раза.

Значительный интерес представляет совершенствование конструкции соединения Т7, в котором мы *предлагаем* нормировать не величину вертикального катета подварочного шва (как это предложено в ГОСТ 14771-76), а его горизонтальный размер, приняв его равным горизонтальному катету выступающей части основного шва (рисунок 4). При выполнении этого условия продольная нагрузка окажется приложенной точно по центру сечения АВ и дополнительный момент в этом сечении не возникает. С целью проверки этого предположения нами был проведен расчет напряженного состояния тавровых соединений с подварочными швами, размеры которых соответствовали условию $k = k_l$. Вертикальный размер подварочного шва оставался постоянным. Полученные результаты приведены на рисунке 5 в виде распределения нормальных напряжений в продольных сечениях соединений. Сравнивая распределения нормальных напряжений в соединении Т6 (рисунок 3а) с распределением в соединении Т7 можно заметить, что наличие подварочного шва приводит к снижению максимальных нормальных напряжений с 1,964 МПа до величины 1,44 МПа, т.е., в 1,36 раза.

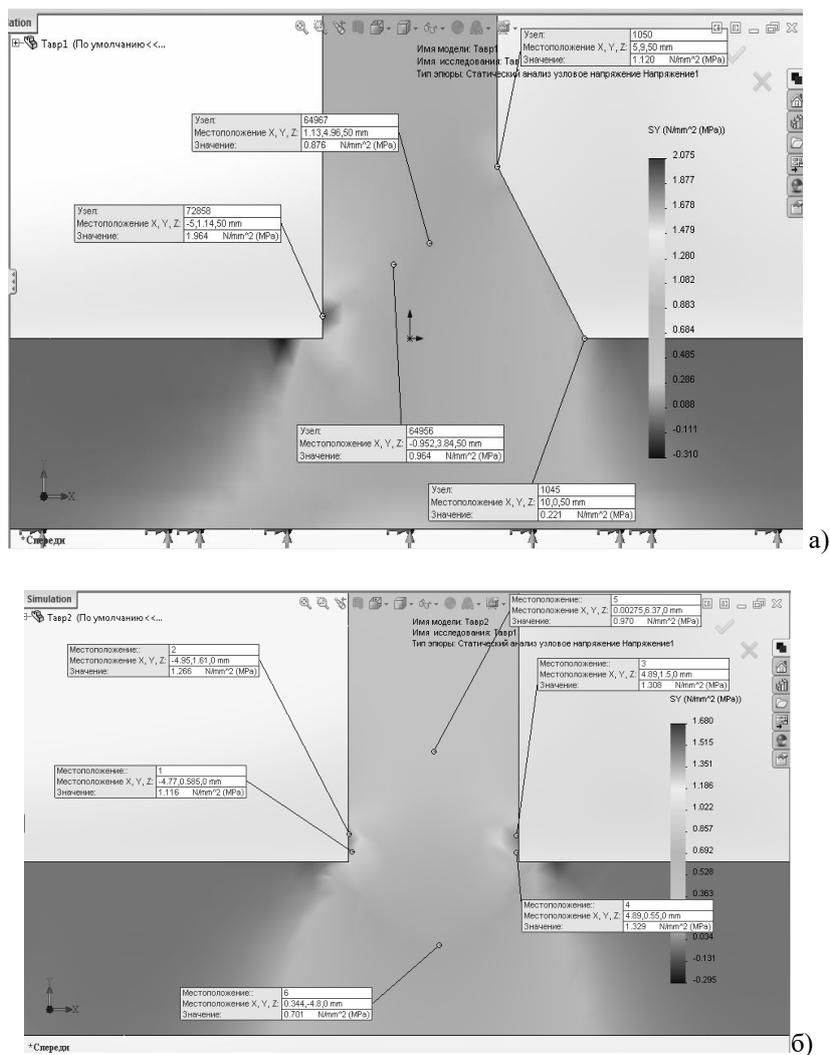


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений в тавровых соединениях:
 а – с выступающей частью сварного шва; б – без выступающей части

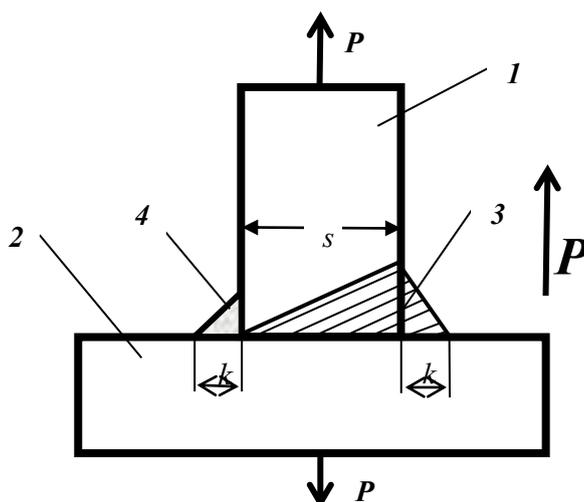


Рис. 4. – Схема одностороннего таврового соединения с подварочным швом.

- 1,2 – соединяемые детали;
- 3 – основной шов;
- 4 – подварочный шов.

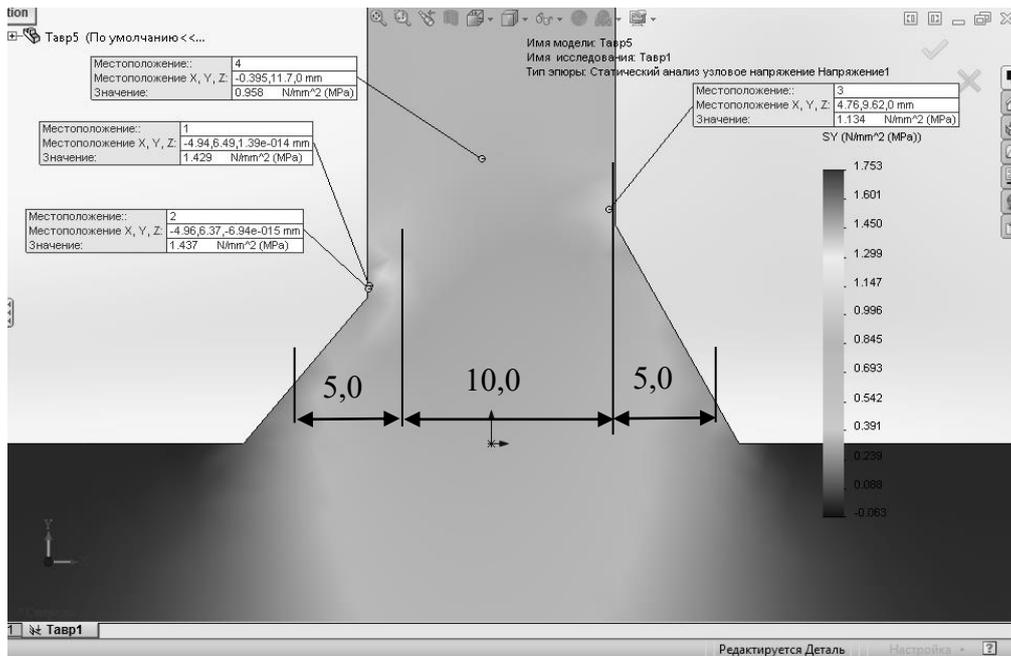
$$k = k_I$$

Стремление к уменьшению размеров выступающей части в комплексе с условием $k = k_1$ обеспечивает заметное снижение размеров подварочного шва и соответственно расходов на его выполнение. Следует отметить, что при выполнении основного шва без выступающей части, отпадает технико-экономическая целесообразность в наличии подварочного шва, который создаст в соединении асимметрию с соответствующим увеличением уровня максимальных напряжений.

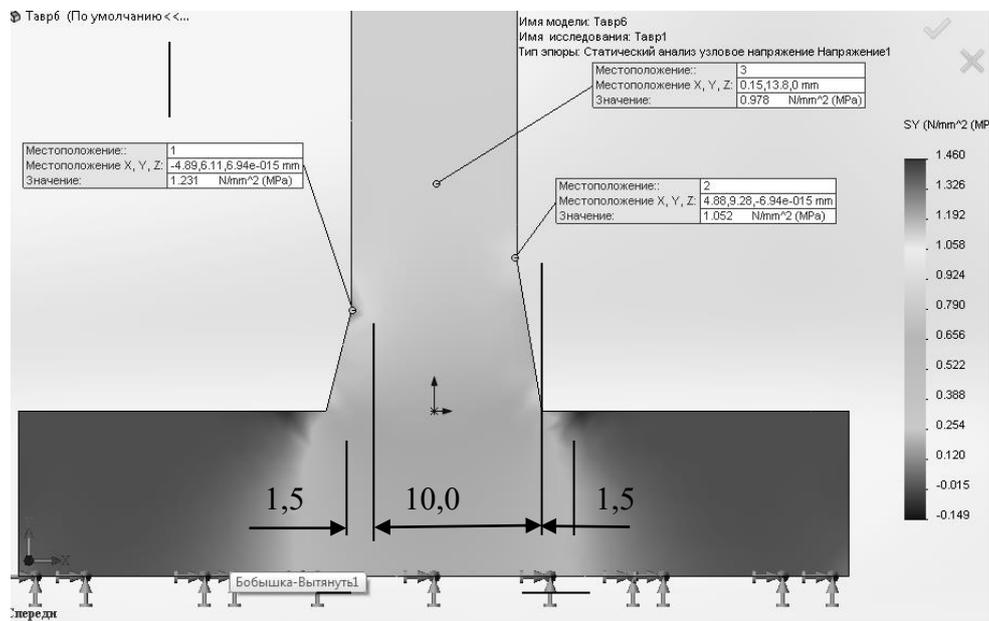
Стремление к повышению экономичности традиционного одностороннего таврового соединения типа Т6 за счет уменьшения угла скоса с 45° до 30° по данным работы [9] при толщине проплавляемого листа 26 мм приводит к образованию непровара $a = 5$ мм, который снижает несущую способность.

Для оценки влияния непровара был проведен конечно-элементный анализ напряженного состояния, результаты которого приведены на рисунке 6. Эти результаты свидетельствуют о значительном влиянии непровара на величину и распределение рабочих напряжений в соединении. При толщине примыкающего элемента $\delta = 26$ мм и наличии непровара величин $a = 5$ мм максимальное расчетное напряжение (нормальное) составило 6,66 МПа. Устранение непровара, достигнутое путем уменьшения толщины примыкающего элемента на величину непровара (с 26 до 21 мм, т.е., в 1,24 раза) при *сохранении величины приложенного усилия* позволило снизить величину максимальных нормальных напряжений в соединении до 3,63 МПа (в 1,83 раза). Уменьшение горизонтального катета выступающей части шва с величины $k = 9$ мм до $k = 5$ мм не только не повысило максимальное значение нормальных напряжений, а привело к снижению их уровня до величины 3,25 МПа (в 1,12 раза). Характерно, что снижение максимальных напряжений достигнуто одновременно с повышением экономичности, т.к. объем наплавленного металла сократился в 1,15 раза. Таким образом, компьютерный анализ напряженного состояния показал, что в односторонних тавровых соединениях уменьшение величины выступающей части повышает их экономичность и несущую способность. Соответственно можно прогнозировать и повышение стойкости сварных соединений к развитию опасных процессов деструкции и роста размеров допустимых дефектов при эксплуатации конструкций [10].

Для сварки одностороннего сварного шва без выступающей части не совсем удобными являются традиционные способы расположения свариваемого таврового соединения «в лодочку» или в угол. Более подходящим представляется горизонтальное расположение стенки (чтобы поверхность сварочной ванны также была горизонтальной). Для улучшения условий доступа к корню свариваемого шва при малых углах скоса кромки нами была использована идея составного конструктивного элемента, предложенная в работе [11]. В результате была разработана конструкция таврового соединения с составным поясом, схематично показанная на рисунке 7. Особенностью этой конструкции является наличие полки, состоящей из двух элементов 1. Благодаря этому стало возможным такое расположение сварных швов 3, при котором они располагаются по одну сторону от полки и их выполнению не мешает стенка тавра. На рисунке 7 показаны скосы, выполненные на стенке тавра. Однако при необходимости их можно выполнить на элементах составного пояса. При малых толщинах соединяемых элементов можно произвести сварку без подготовки кромок и без использования присадочного металла (неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне).



а



б

Рис. 5. Распределение нормальных напряжений в тавровых соединениях типа Т7:
 а – $k = 0,5 s$; б – $k = 0,15 s$

Сравним объемы наплавленного металла в сварных соединениях, показанных на рисунках 4 и 5 при углах скоса 30° . В конструкции соединения, не имеющего выступающей части (см. рисунок 4), площадь поперечного сечения сварного шва определяется следующим образом:

$$F = 0,5tg30^\circ \delta^2, \quad (4)$$

Площадь сечения двух швов в соединении по рис. 5 определится:

$$F1 = 2 \cdot 0,5tg30^\circ \delta_1 \delta_1, \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) δ и δ_1 - соответственно толщина стенки и пояса.

При одинаковой экономичности одинаковыми будут и сечения швов:

$$0,5tg30^\circ \delta^2 = 2 \cdot 0,5tg30^\circ \delta_1 \cdot \delta_1.$$

$$\text{Или } \delta_1 = 0,707 \delta.$$

Таким образом, в тавровых соединениях конструкция с составным поясом обеспечивает меньший объем наплавленного металла при следующем соотношении толщин:

$$\delta > 1,414 \delta_1 \quad (6)$$

У стандартного таврового соединения типа Т6 без учета притупления сечение шва будет иметь площадь $F = 0,5 \delta(\delta + k)$. Приравнявая эту площадь к площади сечения двух швов по рисунку 5, получим:

$$0,5 \cdot \delta(\delta + k) = 2 \cdot 0,5tg30^\circ \delta_1 \delta_1, \quad (7)$$

При $k = \delta/2$ с учетом того, что $tg30^\circ = 0,577$, получим:

$$0,75\delta^2 = 0,577\delta_1\delta_1; \quad (8)$$

$$0,866\delta = 0,76\delta_1.$$

Следовательно, предлагаемое решение обеспечивает более высокую экономичность при $\delta \geq 0,877 \delta_1$.

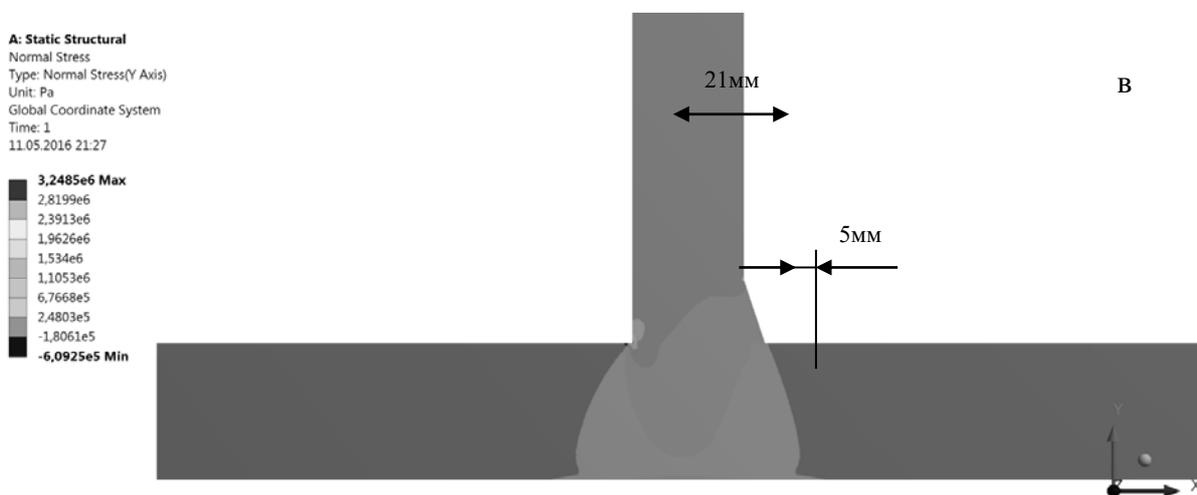
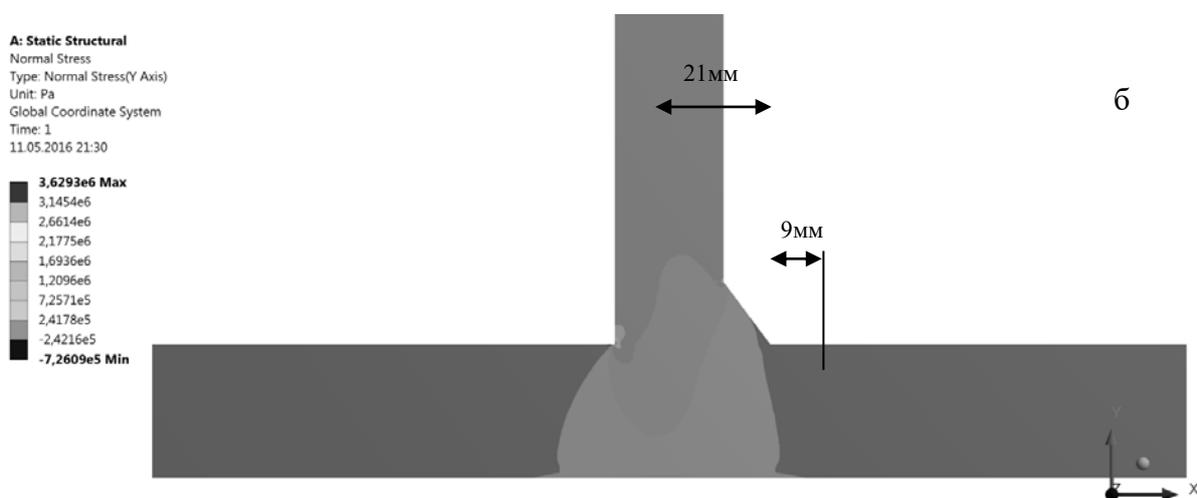
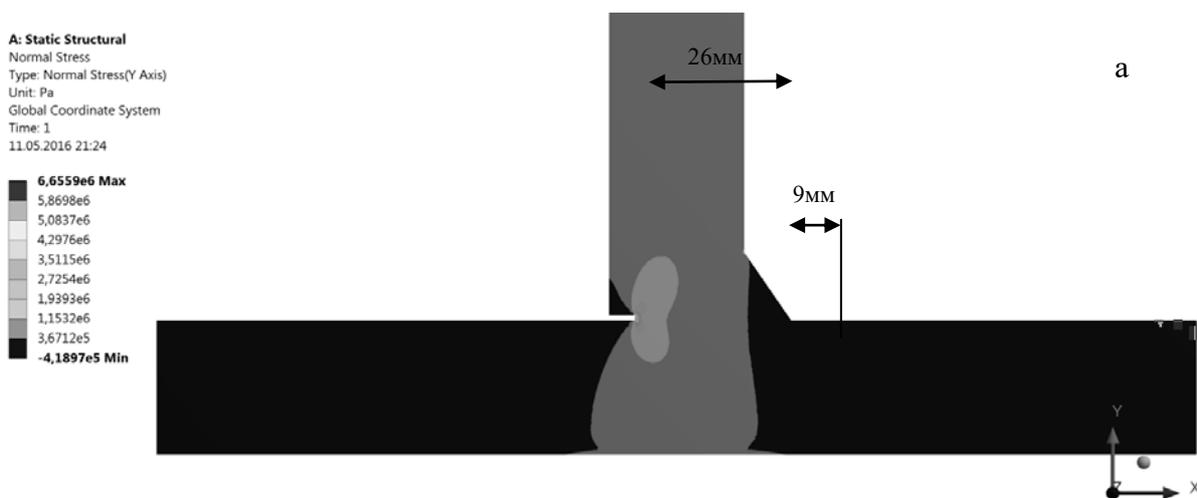


Рис. 6. – Распределения нормальных напряжений в тавровых соединениях:
a – с неповаром; *б* – с толщиной примыкающего элемента, уменьшенной на величину неповара;
в – с уменьшенным размером горизонтального катета углового шва



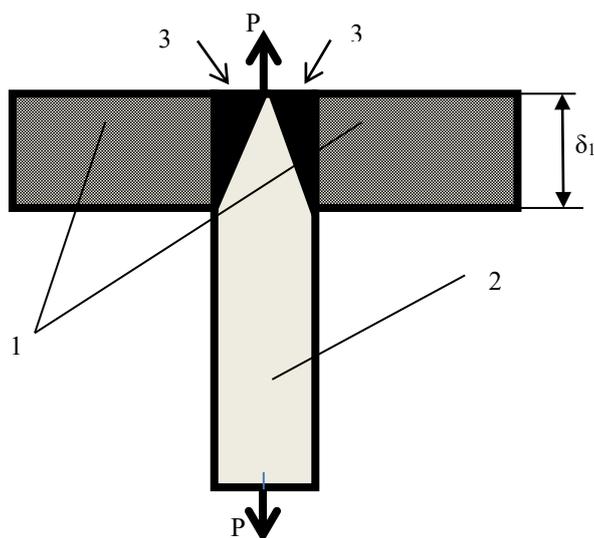


Рис. 7. Одностороннее тавровое сварное соединение с составным поясом:

1 – элементы пояса; 2 – стенка; 3 – сварные швы

Выводы

1. Проведен анализ напряженного состояния одностороннего таврового соединения и установлено, что для обеспечения максимальной несущей способности такое соединение не должно иметь выступающей части у сварного шва, соединяющего стенку с поясом.

2. Для включения в ГОСТ 14771-76 предложена новая конструкция таврового двухшовного соединения с составным поясом, позволяющая производить сварку с удобным доступом к вершине шва при малых углах скоса кромки и приведено условие, при котором оно обеспечивает объем наплавленного металла, меньший, чем стандартное соединение типа Т6.

3. Проведен анализ напряженного состояния одностороннего таврового соединения Т7 и показано, что для обеспечения максимальной несущей способности в таком соединении необходимо нормировать горизонтальный катет подварочного шва, принимая его равным горизонтальному катету выступающей части основного сварного шва и внести соответствующее дополнение в ГОСТ 14771-76.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аснис, А.Е. Снижение металлоемкости сварных швов стальных конструкций / А.Е Аснис, Ю.Г. Мосенкис.- Киев.: Техніка.- 1987.- 109 с.
2. Барышев, В.М. Области применения сварных элементов с односторонними швами в строительных стальных конструкциях / В.М Барышев [и др.] // Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве: тезисы докладов всесоюз. науч.-техн. конф.- Челябинск, 1986.- С. 231.
3. Цумарев, Ю.А. Влияние внецентренного растяжения на напряженное состояние стыкового сварного соединения / Ю.А. Цумарев // Сварочное производство.- 2010.- № 6.- С. 6 – 10.
4. Ю.А. Цумарев. Влияние асимметрии односторонних стыковых швов на распределение напряжений в сварном соединении // Сварка и диагностика.- 2010.-№5.- С. 24-27.
5. Цумарев, Ю.А. Влияние изгиба на концентрацию напряжений в паяных соединениях / Ю.А. Цумарев, Е.В. Игнатова, Е.Ю. Латыпова, Т.С. Латун // Сварочное производство.- 2015.- № 9.- С. 43 - 45.
6. Цумарев, Ю.А. Снижение концентрации напряжений в тавровых неразъемных соединениях / Ю.А. Цумарев, Е.В. Игнатова, Цумарев Е.Н., Е.Ю. Латыпова // Сварочное производство.- 2013.- № 5.- С. 12 – 16.

7. Цумарев, Ю.А. Расчет напряженно-деформированного состояния нахлесточных соединений / Ю.А. Цумарев // Сварка и диагностика.- 2011.- №2.- С. 14 -18.
8. Цумарев, Ю.А. Контактная точечная сварка со специальной подготовкой свариваемых кромок / Ю.А. Цумарев // Автоматическая сварка.- 2010.- № 3.- С. 59 – 61.
9. Иващенко Г.А., Снежков Н.С. Уменьшение массы наплавленного металла угловых швов тавровых соединений с разделкой кромок // Сварочное производство.– 1991.– № 8.– С. 14 – 16.
10. Латыпова, Е.Ю. Продление ресурса эксплуатации трубопроводов с дефектами в сварных соединениях / Е.Ю. Латыпова, Ю.А. Цумарев, В.Н. Клочков // Сварочное производство.- 2017.- № 2.- С. 16 – 20.
11. Латыпова, Е.Ю. Составные конструктивные элементы для неразъемных соединений / Е.Ю. Латыпова, Ю.А. Цумарев // Сварочное производство.- 2016.- № 3.- С. 22 – 38.

