

УДК 621.791.052

**Ю. А. Цумарев, канд. техн. наук, доц., В. П. Куликов, д-р техн. наук, проф.****СНИЖЕНИЕ РЕСУРСОЕМКОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПУТЕМ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ДЕЙСТВУЮЩИЕ СТАНДАРТЫ**

Рассмотрено влияние конструктивных элементов сварных соединений стыкового, таврового и нахлесточного типов на показатели прочности и ресурсоемкости сварных конструкций. Методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ «COSMOS» исследована статическая прочность сварных соединений, получаемых ручной дуговой сваркой плавлением и механизированной сваркой в защитных газах. На основании результатов предложены изменения в действующие стандарты на основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений.

Сварка является важным элементом мирового промышленного комплекса. Широкое применение она находит и в Республике Беларусь, в первую очередь, во всех отраслях машиностроения, в строительстве, энергетике и на транспорте. Поэтому сварочные технологии оказывают серьезное влияние на экономику нашей страны, во многом определяют технический уровень, качество и конкурентоспособность производимой здесь продукции. Характерной особенностью этого технологического процесса является высокая энергоемкость. Суммарные энергетические затраты на сварку достигают 30 % от общего расхода энергии в промышленности [1]. При этом сварные конструкции, выпускаемые в нашей стране, имеют более высокие показатели по материалоемкости, трудоемкости и объему наплавленного металла, чем аналогичные изделия передовых зарубежных производителей [1]. Еще в 1978 г. специалистами в области сварки отмечалось, что сварные конструкции перенасыщены наплавленным металлом [2]. Одной из основных причин такого положения дел авторы [2] вполне обосновано считают несовершенство действующих правил, норм и стандартов, регламентирующих размеры конструктивных элементов сварных соединений и сечений швов. Многие положения этих стандартов действуют и в настоящее время, что сдерживает внедрение в производство

имеющихся научных разработок в области сварки, направленных на экономию ресурсов.

Директива № 3 Президента Республики Беларусь и соответствующие ей постановления Правительства нашей страны требуют максимальной концентрации усилий всех государственных структур на рациональном использовании материальных, энергетических и трудовых ресурсов. Одновременно усиливается ответственность должностных лиц за плохую организацию работ в этой сфере и слабый контроль за эффективностью потребления ресурсов.

Концепцией развития сварочного производства Республики Беларусь на 2001–2015 гг. [1] предусмотрено снижение энергоемкости сварных конструкций в 1,6...1,8 раза, удельного расхода наплавленного металла на тонну сварных конструкций в 1,4...1,6 раза при сокращении издержек производства в 2...3 раза. Успешное решение сложных задач возможно только при поддержке всех органов управления. Большую роль здесь может сыграть корректировка действующих стандартов по сварке и родственным процессам с внесением изменений, исключающих возможность нерационального использования ресурсов. В первую очередь это относится к стандартам, которые определяют основные требования к форме и размерам конструктивных элементов сварных соединений (ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80).

Благодаря своей экономичности и высоким показателям работоспособности стыковые сварные соединения находят широкое применение при производстве сварных конструкций. Основным конструктивным параметром таких соединений, определяющим объем наплавляемого металла, а значит, и ресурсоемкость конструкции, является форма и размеры выпуклости сварного шва. Анализируя данные о размерах стыковых сварных соединений по ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80, можно заметить, что указанные стандарты допускают такие значения этих размеров, которые приводят к существенной асимметрии сварного соединения. Это особенно характерно для пластин небольшой толщины (до 10 мм), свариваемых односторонним стыковым швом. Например, для диапазона толщин 0,8...2 мм допустимой является высота выпуклости до 1,5 мм, что составляет 75...187,5 % толщины соединяемых пластин. При толщинах 2,2...10 мм допустимой является высота выпуклости величиной 2 мм (т. е. 20...90 % от толщины соединяемых элементов). Продольная растягивающая рабочая нагрузка, приложенная к такому соединению, на участке сварного шва оказывается смещенной по отношению к центру тяжести поперечного сечения, проходящего через ось сварного шва. Это приводит к дополнительному изгибу соответствующей области сварного соединения. При этом напряжения от изгибающего момента суммируются с напряжениями от продольной растягивающей силы  $\vec{P}$  и в соединении образуется напряженное состояние внецентренного растяжения, описанное в [3]. Чтобы определить степень и характер влияния высоты выпуклой части шва на распределение рабочих напряжений, нами были проведены расчеты напряженного состояния односторонних стыковых соединений различной геометрии, полностью соответствующей требованиям действующих стандартов. При составлении плана и

выполнении расчетов учитывалось, что на напряженное состояние стыкового сварного соединения влияют многие факторы, которые усложняют постановку задачи и ее аналитическое решение (это, в первую очередь, стесненность изгиба, обусловленная малой длиной изгибаемого участка, равной ширине шва, переменное сечение шва, подвергаемого изгибу, а также концентрация напряжений в местах перехода от выпуклости к основному металлу). Поэтому расчеты были проведены методом конечных элементов с привлечением пакета прикладных программ «COSMOS», что позволило в полной мере учесть все многообразие факторов и особенностей.

На рис. 1 показаны результаты расчета нормальных напряжений по сечению, перпендикулярному сварному шву. Расчет был проведен для одностороннего стыкового сварного соединения пластин толщиной 10 мм с выпуклостью высотой  $c = 3$  мм, шириной шва 12 мм, находящегося под действием растягивающей нагрузки  $\sigma = 200$  МПа. Результаты представлены в виде распределения нормальных напряжений по площадкам, перпендикулярным приложенной нагрузке. Из приведенных на рис. 1 результатов следует, что область сварного шва, прилежащая к его корню, находится под действием нормальных напряжений величиной 237 МПа, тогда как максимальные напряжения в области перехода от выпуклой части шва к основному металлу составляют 260 МПа. При этом напряжения от продольной силы  $P$  в соединяемых пластинах составляют 200 МПа, а напряжения в выпуклой части шва изменяются в пределах от 12 до 76 МПа. Таким образом, результаты расчета подтверждают предположение о том, что распределение нормальных напряжений в целом соответствует схеме сложения напряжений от растягивающей силы и от изгиба.

Для получения сравнительных данных о влиянии относительной высоты

выпуклости на напряженное состояние стыкового сварного соединения расчет с использованием программы «COSMOS» был выполнен для аналогичного сварного соединения с теми же размерами выпуклой части шва, но с пластинами основного металла толщиной  $\delta = 6$  мм. Результаты расчета представлены на рис. 2 таким же образом, как и в ранее рассмотренном случае соединения пластин

толщиной 10 мм. Сравнение этих результатов показывает, что выпуклость таких же размеров, но при меньшей толщине соединяемых пластин оказывает более заметное отрицательное воздействие на напряженное состояние сварного соединения в области, прилегающей к корню сварного шва. Нормальные напряжения здесь возросли до величины 260 МПа.

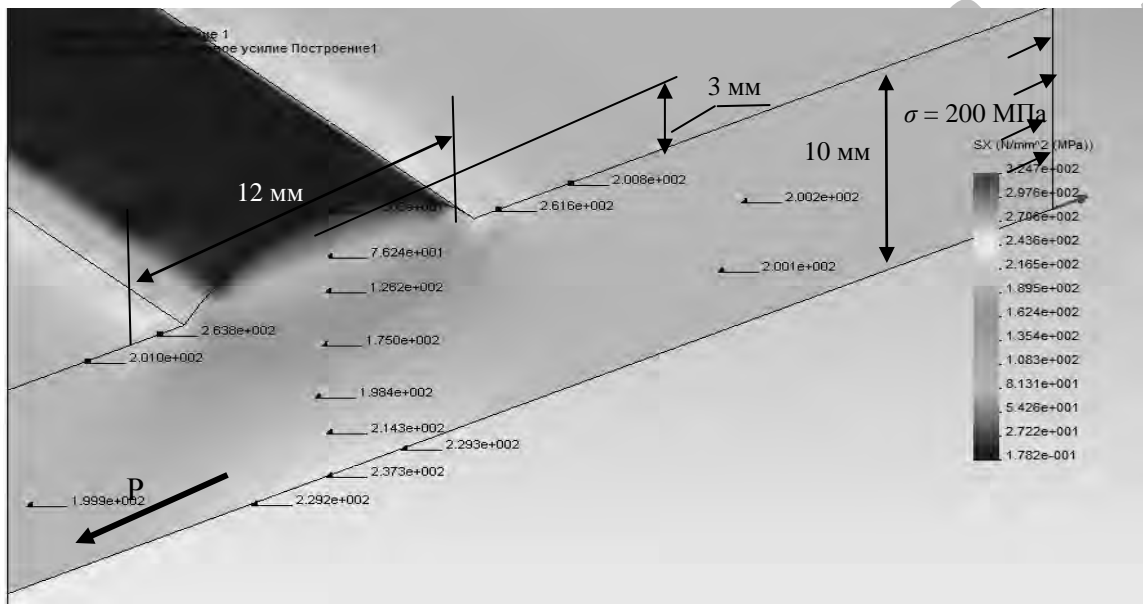


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений по поперечному сечению одностороннего стыкового сварного соединения пластин толщиной 10 мм

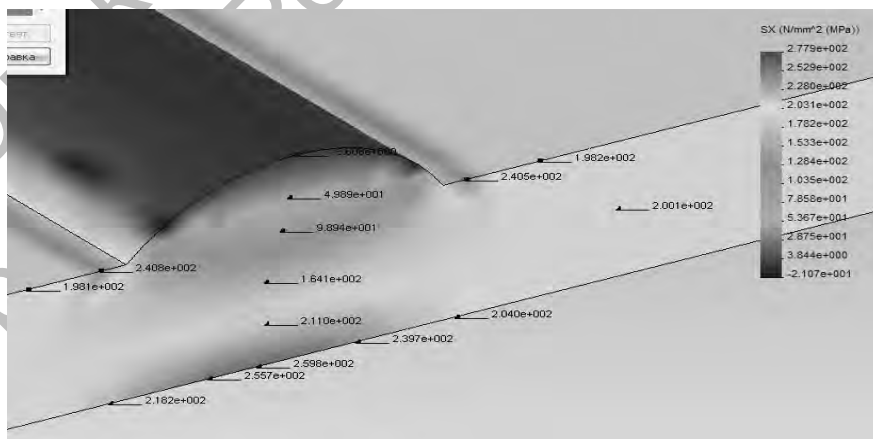


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений по поперечному сечению стыкового сварного соединения при толщине пластин 6 мм

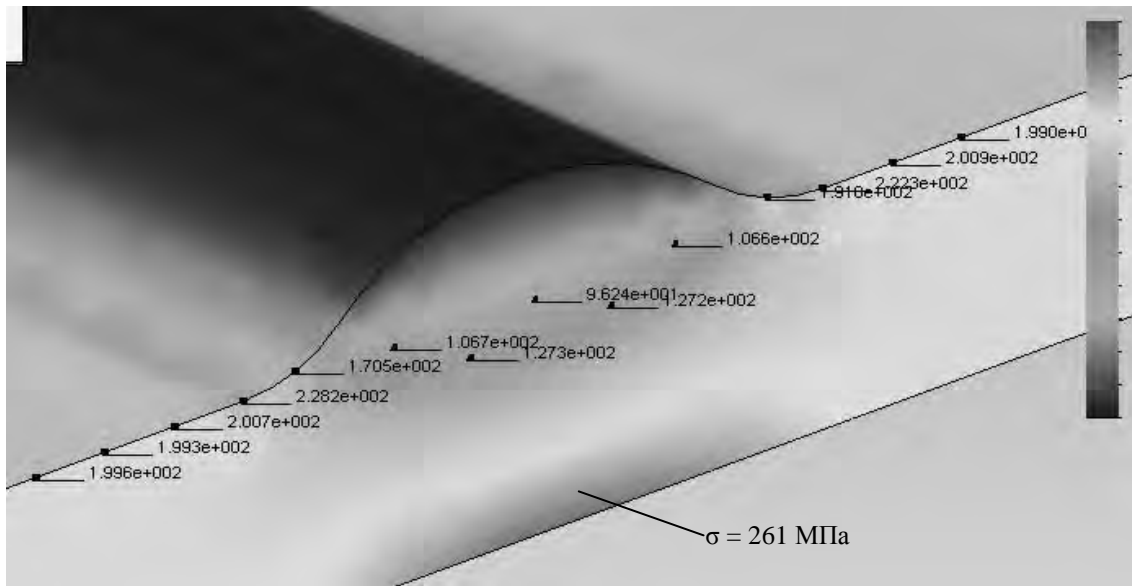


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений по поперечному сечению стыкового сварного соединения с плавным переходом от шва к основному металлу при толщине основного металла 6 мм

При выполнении плавного перехода от шва к основному металлу в зоне, прилегающей к корню сварного шва, нормальные напряжения уменьшились с 241 до 228 МПа, т. е. всего на 6 %. Напряжения же в корневой части шва по-прежнему остались на уровне 260 МПа.

Чтобы сделать более обоснованные выводы о влиянии выпуклости шва на несущую способность стыкового сварного соединения, был произведен расчет сварного соединения пластин толщиной 6 мм, в котором высота выпуклости была уменьшена до 1 мм. Результаты расчета приведены на рис. 4. Они показывают, что уменьшение такого параметра, как высота выпуклости, оказывает четко выраженное положительное влияние на распределение рабочих напряжений. Уменьшились максимальные значения нормальных напряжений как в местах перехода от шва к основному металлу (с 240 до 223 МПа), так и в корневой части шва (с 260 до 240 МПа). Очевидно, что при полном отсутствии выпуклой части сварного шва нормальные напряжения в области сварного шва будут распределены точно так же, как и в соединяемых пластинах. Неравномерность распределения рабочих напряжений будет отсут-

ствовать, а несущая способность станет максимальной. Необходимо особо отметить, что в последнем случае снижение уровня максимальных напряжений и соответствующее повышение несущей способности были достигнуты за счет уменьшения в 3 раза объема наплавленного металла, расходуемого на выполнение выпуклой части шва.

Таким образом, выпуклая часть стыкового сварного шва является фактором, который оказывает вредное влияние не только на экономичность сварного соединения, но и на его работоспособность. Поэтому при разработке технологического процесса сварки и назначении параметров его режима необходимо особое внимание уделять возможности получения швов с минимальной высотой выпуклости. Однако эта тенденция далеко не полностью отражена в ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80, в которых зачастую завышены номинальные значения высоты выпуклости стыковых сварных швов. В первую очередь это относится к сварным соединениям, выполняемым неплавящимся электродом (ГОСТ 14771-76). Также завышены и максимальные предельные отклонения на этот конструктивный параметр.

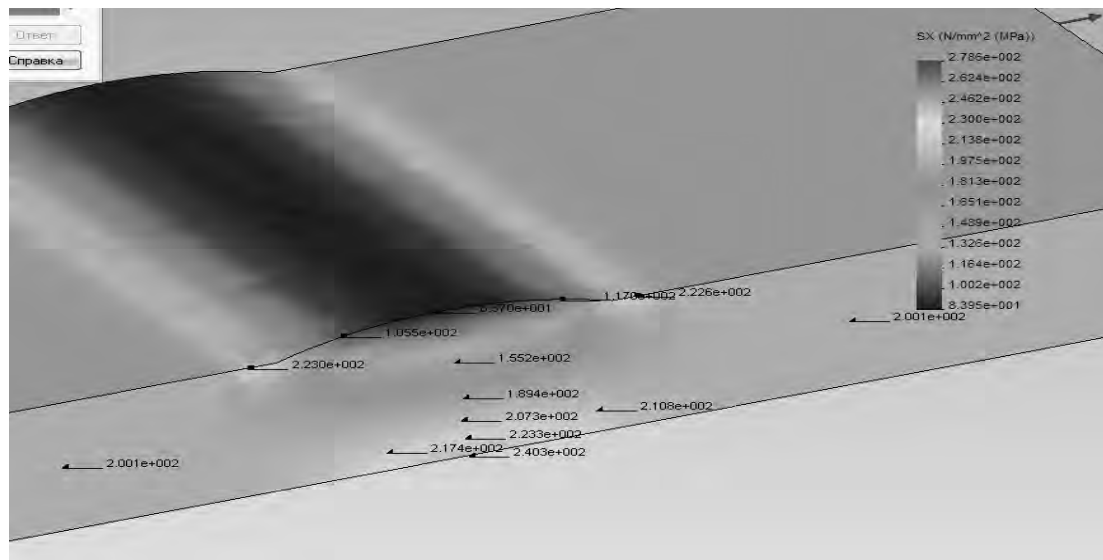


Рис. 4. Распределение рабочих нормальных напряжений в сварном соединении с высотой выпуклости, уменьшенной до 1 мм

Авторы данной работы считают, что возросший уровень развития сварочной техники позволяет не только уменьшить номинальные размеры высоты выпуклости и величину максимального предельного отклонения этого параметра до 0,5 мм, но и сократить объем наплавленного металла при сварке малых толщин в 1,5...2 раза. В определенной мере это относится и к стыковым соединениям всех видов, выполняемым со скосами свариваемых кромок, хоть относительная экономия получается меньшей из-за того, что выпуклость составляет меньшую долю от общего объема шва.

Значительные резервы экономии всех видов ресурсов при выполнении сварочных работ связаны с повышением точности обработки деталей для сварных конструкций, а также с уменьшением углов скоса свариваемых кромок. Например, приняв для соединений типа С8, С9, С10, С11 и С12, свариваемых в инертном газе, угол скоса кромки таким же, как и для сварки в углекислом газе (т. е.  $40^\circ$  вместо  $50^\circ$ ), объем наплавленного металла можно сократить примерно в 1,4 раза. При этом указанное сокращение объема наплавленного металла может быть достигнуто без каких-либо технологических затруднений, т. к.

условия доступа к корню свариваемого шва при сварке в инертных газах ничуть не сложнее, чем при сварке в углекислом газе. Последнее предложение особенно актуально в связи с расширением объемов сварки в газовых смесях, основу которых составляет инертный газ аргон. В несколько меньшей степени можно использовать вышеизложенные предложения при ручной дуговой сварке (ГОСТ 5264-80).

Много вопросов возникает при рассмотрении размеров конструктивных элементов сварных стыковых соединений, выполняемых с отбортовкой кромок (соединения типа С1 и С3). Эти размеры в ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80 являются идентичными. Оба стандарта предусматривают возможность применения такого типа соединений для толщин до 4 мм. По нашему мнению, такой диапазон толщин здесь нельзя считать достаточно обоснованным. Это мнение обусловлено не только тем, что при толщине 4 мм отбортовка не дает никаких технологических преимуществ по сравнению с соединениями, выполняемыми на остающейся подкладке (т. е. соединением типа С5). Здесь следует учесть также сложность получения отбортованных заготовок при толщинах, пре-

вышающих 3 мм. Кроме того, соединения с отбортовкой кромок имеют более высокие показатели по объему расплавленного металла и по степени асимметричности готового сварного соединения, которая, как было показано выше, снижает нагрузочную способность изделий. Проведенные авторами расчеты показали, что в соединении листов толщиной 4 мм с отбортовкой кромок минимального радиуса объем расплавленного металла в 1,5 раза больше, чем при сварке на остающейся подкладке. Соответственно возрастает и энергоемкость процесса, увеличивается уровень сварочных деформаций. В готовом сварном соединении шов имеет большую величину смещения относительно линии действия приложенных продольных сил, чем в соединении с остающейся подкладкой. В таком соединении образуется не только выпуклая часть, но и вогнутость, обусловленная изгибом листов при выполнении отбортовки. Как показали расчеты, уровень рабочих напряжений в вогнутой части соединения в 3,5...5 раз превышает величину приложенных напряжений, что предопределяет низкие характеристики работоспособности изделий особенно при циклическом и ударном нагружении. Поэтому авторы считают, что соединения с отбортовкой кромок можно признать допустимыми только для толщин, не превышающих 2...2,5 мм.

Еще более значительную экономию ресурсов можно получить за счет внесения изменений в те разделы ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80, которые касаются сварки соединений с угловыми швами. Здесь можно отметить два наиболее важных предложения. Первое из них связано с величиной предельных отклонений размеров катетов угловых швов. Они указаны в приложении 4 изменений к ГОСТ 14771-76 от 1989 г. и аналогичном приложении 3 изменений к ГОСТ 5264-80. Рассмотрим подробно значения этих предель-

ных отклонений и те последствия, к которым они приводят. Например, для катетов с номинальным размером до 5 мм включительно в ГОСТ 14771-76 и в ГОСТ 5264-80 предусмотрено максимальное верхнее отклонение, которое равно 1 мм. Это означает, что вместо номинального катета величиной 4 мм стандартный шов может иметь катет величиной 5 мм. Но тогда во втором случае поперечное сечение шва увеличится с 8 до 12,5 мм<sup>2</sup>, т. е. в 1,56 раза. Далее, для катетов от 5 до 8 мм предусмотрено максимальное предельное отклонение величиной 2 мм. Таким образом, вместо номинального катета 5 мм стандартный шов может иметь катет величиной 7 мм. При этом его сечение возрастет с 12,5 до 24,5 мм<sup>2</sup>, т. е. в 1,96 раза. С увеличением номинального размера катета до 8 мм это увеличение объема наплавленного металла несколько уменьшится. Если вместо катета с номинальным размером 8 мм получить сварное соединение с катетом 10 мм, как это разрешено ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80, то объем наплавленного металла возрастет с 32 до 50 мм<sup>2</sup>, или в 1,56 раза. Так же завышено и максимальное отклонение для катетов более 12 мм, которое составляет 3 мм. Для катета величиной 13 мм сечение шва, а значит, и расход ресурсов возрастет в 1,5 раза. По нашему мнению, максимальные предельные отклонения от номинальных значений катета можно снизить в 2 раза. При этом перерасход ресурсов на выполнение сварных швов сократится не менее, чем на 50 %.

Второе предложение связано с изменением подхода к конструктивным элементам нахлесточных сварных соединений, которые достаточно широко применяются при изготовлении сварных конструкций. ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80 не предусматривают для такого рода соединений никакой подготовки кромок. И это приводит к пере-

расходу ресурсов не менее, чем в 2...3 раза. Авторы считают, что в указанные стандарты необходимо внести изменения, добавив соединения с прямолинейной и криволинейной формами подготовки кромок, аналогичными тем, которые предусмотрены для тавровых соединений с соответствующей толщиной свариваемых заготовок.

Необходимо также изменить подход к назначению величины нахлестки такого рода сварных соединений с угловыми швами. Ее следует указывать кратной толщине соединяемых листов. Действующие же стандарты создают возможность применения совершенно неправильно назначенных размеров нахлестки. Например, при толщине заготовок 5 мм допустима нахлестка величиной 3 мм, а при толщине металла 29 мм нахлестка может иметь величину 12 мм. Этого явно недостаточно для нормальной работы сварного соединения под нагрузкой, т. к. резко возрастет концентрация рабочих напряжений в нем. Возможна и другая крайность, когда размеры нахлестки окажутся слишком велики. Например, при толщине металла 2 мм нахлестка будет иметь величину 20 мм, а при толщине металла 10 мм нахлестка может иметь размер 100 мм. По нашему мнению, в ГОСТ 14771-76, как и в ГОСТ 5264-80, необходимо исключить возможность получения таких вариантов

при конструировании и изготовлении сварных соединений.

### Вывод

В действующие стандарты по основным типам, конструктивным элементам и размерам сварных соединений (ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 5264-80) необходимо внести ряд изменений, обеспечивающих снижение расхода материальных и энергетических ресурсов при изготовлении сварных конструкций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция развития сварочного производства Республики Беларусь на 2001–2015 гг. // Сварка и родственные технологии : мировой опыт и достижения : материалы II Международ. симпозиума. – Минск, 2001. – С. 215–254.
2. **Казимиров, А. А.** Пути уменьшения материалоемкости сварных металлоконструкций / А. А. Казимиров, В. Н. Алилуева // Сварочное производство. – 1978. – № 1. – С. 14–16.
3. **Тимошенко, С. П.** Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. – М. : Мир, 1976. – 669 с.
4. **Аснис, А. Е.** Снижение металлоемкости и энергоемкости конструкций, работающих при циклических нагрузках и отрицательных температурах / А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко // Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве. – Челябинск, 1986. – С. 213–215.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 23.03.2010

**Y. A. Tsumarev, V. P. Kulikov**  
**The reduction of resource consumption of welded joints by modification operating standards**

The article considers the influence of structural elements of butt, T-shaped and lap welds on strength index and resource consumption. The static strength of welded joints was researched by the finite element method with the usage of package «COSMOS». The joints appear with the help of manual arc and machine fusion welding in shielding gas. On the base of the obtained results some changes were proposed in using standards on principal types, structural elements and the dimensions of welded joints.