



УДК 621.791:62-112.82]

ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНОГО НАГРЕВА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОЛЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СТАЛЕЙ

К. БРУНС, Т. МЮЛЛЕР, Й. ВИБЕ, Й. ГЕРМАНН¹, Б. КРАНЦ², Р. РОЗЕРТ³¹ SLV Halle GmbH, 06118, Germany Halle, Koethener Str. 33a. www.slv-halle.de² Abteilungsleiter Forschung und Entwicklung³ Drahtzug Stein wire & welding GmbH&Co.KG. 67317, Germany, Altleiningen, Talstrasse, 2. www.drahtzug.com

Проведены сварочные опыты и технологическая оценка полых профилей квадратного сечения размером 80×80×10 мм из стали марки SG 69 Q. Сварные швы оценивали по макрошлифам, путем измерения твердости, испытанием на статическое растяжение и ударный изгиб. Для определения усталостной прочности при испытании на изгиб при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,5$ в условиях завода рельсовых транспортных средств эти профили сваривали в среде защитных газов с помощью механизированной сварки проволокой сплошного сечения и порошковой. Выполнено сопоставление результатов испытаний на усталостную прочность профилей и их соответствие нормативным требованиям. Даны рекомендации по применению различных профилей в конструкциях с циклической нагрузкой. Библиогр. 18, табл. 5, рис. 12.

Ключевые слова: дуговая сварка, металлический электрод, защитный газ, высокопрочные стали, полые профили, усталостная прочность, облегченные конструкции, рекомендации к применению

Такие конструктивные элементы, как квадратные и прямоугольные полые профили, уже десятки лет применяют в машино- и аппаратостроении, в производстве транспортных средств и стальных конструкций. Именно бесшовные горячекатаные полые профили без продольного сварного шва имеют однородные свойства материала по всему сечению. Поскольку при изготовлении профили не подвергаются холодной деформации, они отличаются превосходной свариваемостью, особенно в области кромок. Кроме того, бесшовные горячекатаные полые профили имеют широкий спектр толщин стенок даже при сравнительно малой длине кромки. Благодаря своим большим плоским поверхностям примыкания в результате небольших угловых закруглений они отлично

подходят для компактных конструкций, выдерживающих высокие нагрузки [1, 2]. Для стальных конструкций преимущественно применяют стали с классом прочности до 355 МПа. Стали с повышенной прочностью востребованы в сельскохозяйственном машиностроении, где используют прямоугольные и квадратные профили с пределом текучести до 500 МПа (рис. 1). Кроме того, предлагаемые фирмой «Vallourec & Mannesmann» высокопрочные стали с пределом текучести до 960 МПа уже находят применение в транспортном машиностроении, что стало существенным вкладом в решении задачи облегчения конструкций. Однако применение высокопрочных сталей в транспортном машиностроении сопряжено с необходимостью учета усталостных свойств соеди-



Рис. 1. Изготовление MSH-профилей квадратного сечения в последней прокатной клетки (а) и их применение в сельскохозяйственном машиностроении (б)

нений. С точки зрения допустимого количества циклов нагрузок при заданной совокупности нагружения очень важна оценка свойств металла прежде всего в области сварных швов. В связи с этим были проведены исследования по оценке влияния нагрузки на свойства сварных деталей определенной конфигурации. Выбор размеров, сталей, спектра и объемов исследований ориентированы с учетом требований транспортного машиностроения.

Речь идет о стальных прямоугольных или квадратных полых профилях под маркой MSH, изготовленных из нелегированных или мелкозернистых конструкционных сталей согласно EN 10 210-1 [3] фирмой «Vallourec & Mannesmann». В спектр поставки входят горячекатаные профили размером от 40×40 до 300×300 мм (квадратные) и от 50×30 до 300×200 мм (прямоугольные). Кроме того, можно получить MSH-профили с продольными швами, выполненными высокочастотной индукционной контактной сваркой, и MSH-профили металла горячей прокатки размером 400×400 (квадратные) или 500×300 мм (прямоугольные). Толщина стенки стандартная до 20 мм.

Улучшенные MSH-профили, разработанные на основе концепции легирования мелкозернистых сталей прочностью от 690 до 890 МПа, в продажу поступают под названием FineXcell®. При этом у них минимальные пределы текучести 690 МПа в нижнем интервале толщины стенки (≥16 мм) и удовлетворительная вязкость.

Сварка мелкозернистых конструкционных сталей. При сварке необходимо удостовериться, что свойства материала ухудшатся от термического воздействия не больше, чем от нагрузки самой конструкции. Поскольку на свойства соединения существенно влияют условия сварки, задача специалистов — обеспечить требуемые металлургические свойства наплавленного металла и металла ЗТВ. Механические свойства сварных соединений определяются температурно-временным циклом сварки. Большое влияние оказывают ток, напряжение, скорость сварки, а также толщина изделия и геометрия шва. Собственно эти параметры определяют температурно-временной цикл сварки, часто характеризуемый скоростью охлаждения металла в температурном интервале от 800 до 500 °С. Высокая скорость охлаждения металла шва из аустенитной области может уменьшить вязкость металла ЗТВ сварного соединения. Кроме того, в наплавленном металле и в металле ЗТВ может возрастать опасность появления холодных трещин. В результате более медленного охлаждения сварного шва его прочность понизится и не будет соответствовать прочностным свойствам основного металла.

Эффективным средством предупреждения холодных трещин является подогрев. Под температурой подогрева подразумевается температура изделия в области шва непосредственно перед сваркой. В зависимости от материала, толщины его стенки, геометрии шва и значения погонной энергии назначают температуру подогрева. С ростом толщины металла температуру повышают, что замедляет охлаждение зоны металла шва и способствует выделению водорода. Кроме того, подогрев оказывает положительное влияние на внутреннее напряженное состояние соединений. Предрасположенность сталей к холодным трещинам существенно влияет на стоимость выполнения сварочных работ. По этой причине важно классифицировать стали в зависимости от их трещиностойкости. Полезная информация по этой проблеме опубликована в работах [4–7], где в качестве критерия трещиностойкости предложен углеродный эквивалент CET (%):

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40.$$

При появлении холодных трещин ситуация может быть таковой, что температура подогрева была выбрана правильно, но в изделии неправильно оценили фактический теплоотвод. Во-первых, согласно [8] температуру подогрева следует измерять на достаточном расстоянии от сварного шва. Во-вторых, необходимо тщательно подогревать места, где встречается несколько сварных швов и там наряду с повышенным теплоотводом может иметь место трехмерное напряженное состояние, дополнительно способствующее образованию холодных трещин. Кроме химического состава основного и наплавленного металла, появление холодных трещин в значительной степени зависит еще и от толщины стенки, содержания водорода в наплавленном металле, а также внутреннего напряженного состояния соединения. Метод расчета минимальной температуры подогрева, известный под названием «концепция CET», включен в журнал «SRAHL-EISEN-Werkstoffblatt SEW 088» [9], а также в стандарт EN 1011 [10].

Тепловложение Q рассчитывается путем определения погонной энергии E и в зависимости от термического КПД процесса η согласно известному уравнению, описанному в [10]:

$$E = \frac{U_d I_{cb} 60}{v_{cb} \cdot 10000} \text{ (кДж/мм)} \text{ или } Q = \frac{\eta U_d I_{cb} 60}{v_{cb} \cdot 10000} \text{ (кДж/мм)},$$

U_d — сварочное напряжение, В; I_{cb} — сила сварочного тока, А; v_{cb} — скорость сварки, см/мин; η — термический КПД MAG равный 0,85.

Технологические исследования. Выбор присадочного материала. Для сварки высокопрочных мелкозернистых конструкционных сталей приса-



дочные материалы различных производителей и поставщиков выбирают в зависимости от их предела текучести. Применяют как проволоку сплошного сечения, так и порошковую в соответствии с EN DIN 18276 в среде защитных газов M21 (18 % CO₂ + 82 % Ar) согласно EN ISO 14175 [11]. При выборе проволоки необходимо учитывать не только стоимость, но и производственные затраты на изготавливаемую конструкцию.

В этом отношении бесшовные рutilовые, основные или порошковые проволоки с металлическим порошком имеют преимущества по сравнению с проволокой сплошного сечения, так как обеспечивают специфические свойства. В описанных далее сварочных экспериментах применяли следующие присадочные материалы:

проволоку сплошного сечения согласно EN ISO 16834-A GMn4Ni1,5CrMo [12] (ED-FK 800);

порошковую проволоку с металлическим порошком для сварки корня согласно EN ISO 17632-A T 69 6 Mn2 NiCrMo M M1 H5 [13] (STEIN-MEGAFIL 742 M), а также рutilовую порошковую проволоку для заполняющих и облицовочных валиков согласно EN ISO 17632-A T 69 6 Z P M 1 H5 (STEIN-MEGAFIL 690 R).

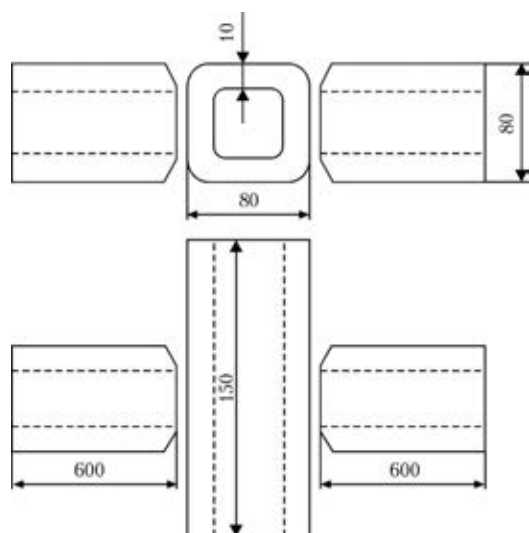


Рис. 2. Схема и размеры образцов

Указанные материалы пригодны для сварки мелкозернистых конструкционных сталей, в том числе исследуемых MSH-профилей. В настоящей работе оценивали влияние данных материалов на геометрию швов и длительную прочность сварных соединений.

Методика проведения опытов. Требования к качеству сварных соединений выдвигают прежде всего при применении этих полых профилей в конструкциях с динамической нагрузкой [14, 15]. Полые профили сваривали как для определения механико-технологических характеристик, так и для оценки усталостной прочности. В последнем случае определяли размеры и геометрию швов на свариваемых узлах. Было изготовлено 36 узлов, в которых между соединяемыми профилями был вставлен полый профиль длиной 150 мм (рис. 2). При этом проволокой сплошного сечения и порошковой сварили по 18 образцов. Затем определили сварочные параметры в соответствии с разделкой. Параллельно разработаны приспособления для прихватки и сварки, а также установлена последовательность сварки. При разработке технологии рассчитывали температуру подогрева и теплового режима. Была назначена температура подогрева и температура промежуточных слоев 80...100 °С, а в качестве защитной среды использовали газ M21.

Процесс состоял из установки деталей в приспособление для выравнивания, позиционирования и прихватки профилей, подшлифовки прихваток перед сваркой корня, сварки корневого валика в нижнем положении попеременно с обеих сторон, установки деталей в приспособление для сварки промежуточных валиков (HV-швы при выполнении углового шва (рис. 3, а)), сварки верхнего валика (HV-швы при выполнении стыкового шва). Готовые сварные соединения, выполненные для исследования усталостной прочности, представлены на рис. 3, б.

Разделка кромок и последовательность сварки. При подготовке образцов под сварку для будущей оценки усталостной прочности соединений профили механически обрабатывали так,

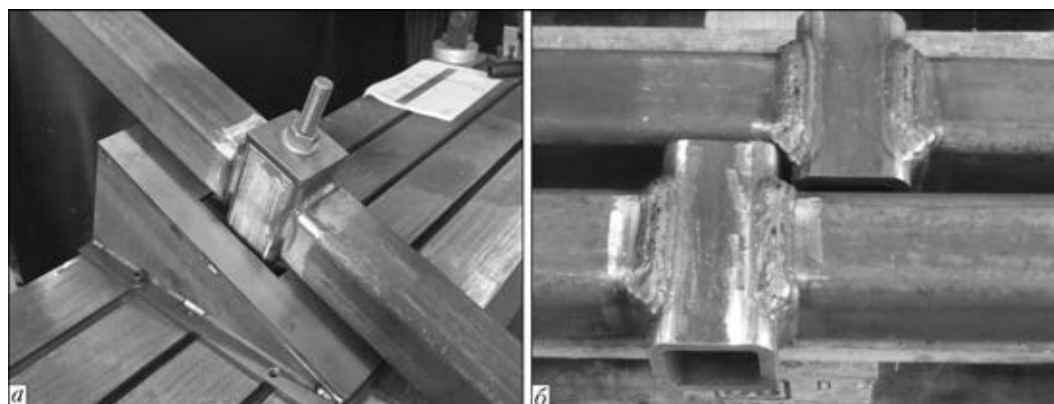


Рис. 3. Сварные узлы с угловыми (а) и стыковыми (б) швами

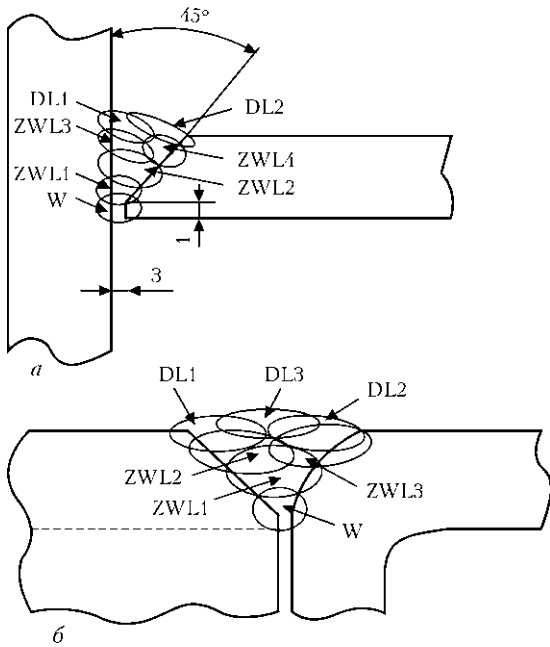


Рис. 4. Схема разделки кромок и последовательность сварки для углового (а) и стыкового (б) шва (W — корень шва; ZWL — промежуточный слой; DL — верхний валик)

чтобы в области сварного шва был угол раскрытия 45° при высоте притупления 1 мм. Для надежной проварки корня шва устанавливали зазор 3 мм, конструкции соединения и последовательность сварки приведены на рис. 4.

Виды испытаний. *Макрошлифы.* Для оценки качества сварных соединений был проведен неразрушающий контроль (НК). Затем из сварных

стыковых и угловых соединений изготавливали макрошлифы (рис. 5, а–г).

Испытания на растяжение. Этот вид испытаний должен был показать соответствие значений предела текучести и относительного удлинения соединений требованиям, предъявляемым к полым профилям из FineXcell® 690 Impact FIT50 с определенной толщиной стенки.

Результаты испытаний, представленных на рис. 6, показали, что как стыковое соединение, так и угловое поставленным требованиям удовлетворяют. Во всех соединениях у наплавленного металла и основного металла была прочность на растяжение выше нормативных требований.

Вязкость. Требования к материалу FineXcell® 690Impact FIT50 (SQ 69 Q) представлены в табл. 1. Как видно из рис. 7, в металле ЗТВ и наплавленном металле достигнута требуемая работа удара (23 Дж) в продольном направлении стыкового соединения при всех температурах испытания в соответствии с EN 10025-1 и 10025-6.

Характеристики твердости. В образцах, представленных на рис. 8, твердость измеряли (HV_{10}) со стороны поверхности шва и с нижней его стороны. При сравнении измеренных значений твердости наплавленного металла порошковой проволокой и проволокой сплошного сечения оказалось, что при порошковой твердость ниже. Максимальные значения наблюдались в металле ЗТВ. Серия измерений твердости с верхней стороны шва продемонстрировала более высокие значения

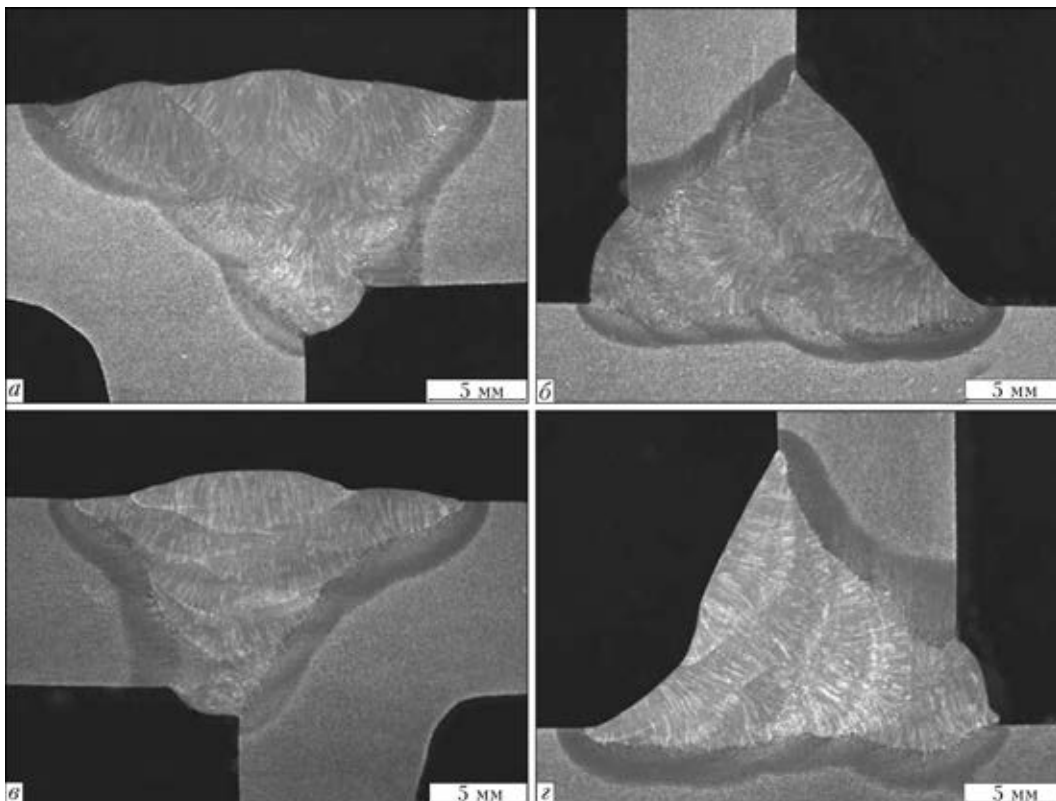


Рис. 5. Макрошлифы стыковых и угловых швов, сваренных проволокой сплошного сечения M1S, M1K (а, б) и порошковой F1S, F1K (в, г)

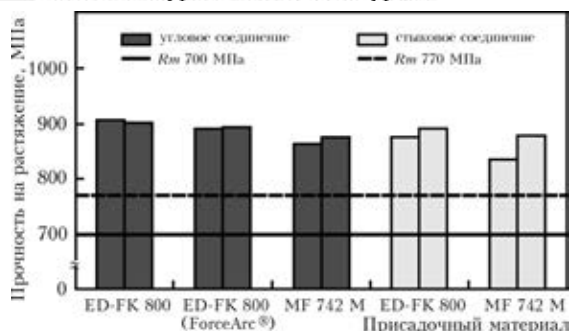


Рис. 6. Экспериментальные данные испытаний на статическое растяжение сварных соединений из стали SG 69 Q

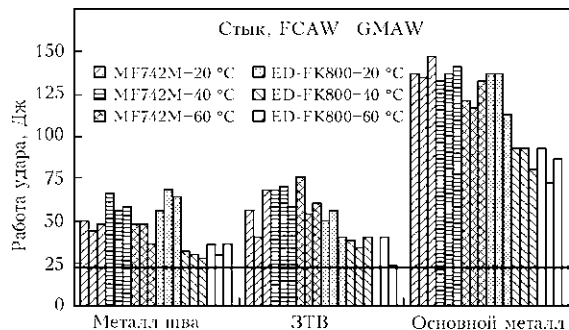


Рис. 7. Работа удара образцов из материала SG 69 Q размером 80×80×10 мм

— это сопоставление еще раз представлено на диаграмме (рис. 9). Видно, что в образцах, сваренных порошковой проволокой, показатели твердости ниже как в наплавленном металле, так и в металле ЗТВ.

Усталостная прочность. Рассмотрим подход и результаты испытаний на усталостную прочность сварных соединений из профиля размером 80×80×10 мм из SG 69 Q, изготовленных с учетом рекомендации МИС [16]. Требовалось исследовать представленные в табл. 2 виды нагрузок с учетом применяемых присадочных материалов.

Для определения усталостной прочности проведены испытания по Вёлеру. Для каждой линии Вёлера изготовили примерно по 7...8 натуральных образцов, которые испытывали на четырехточечный изгиб (рис. 10).

Для сравнения установившейся усталостной прочности с показателями согласно с рекомендациями МИС [16] потребовалось испытание с постоянным коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,5$. Затем производили сопоставление с учетом вероятности безотказной работы $P_u = 97,5 \%$

Таблица 1. Требования к ударной вязкости, предъявляемые к полым профилям из материала FineXcell® 690 ImpactFIT50 с толщиной стенки ≥ 20 мм

Направле- ние соеди- нения	Работа удара как минимальная на трех образцах Шарпи при температуре контроля, °С, Дж			
	-50	-40	-20	0
Вдоль	27	30	40	65
Поперек	16	27	30	40

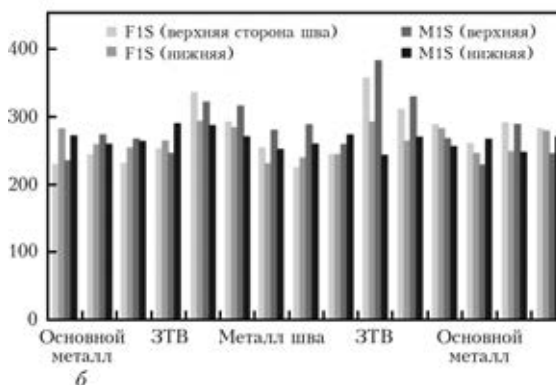
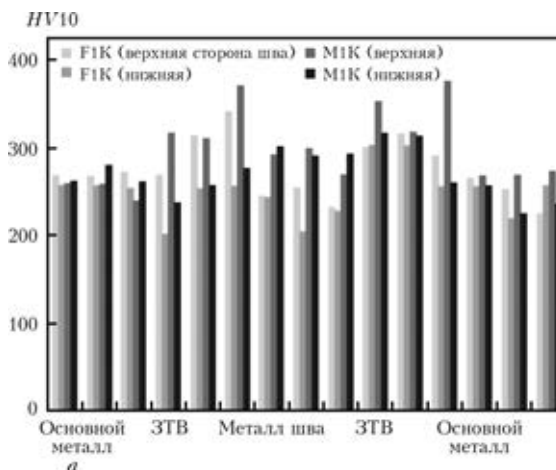


Рис. 8. Измерение твердости на угловых (а) и стыковых (б) швах (F — порошковая проволока; M — сплошная)

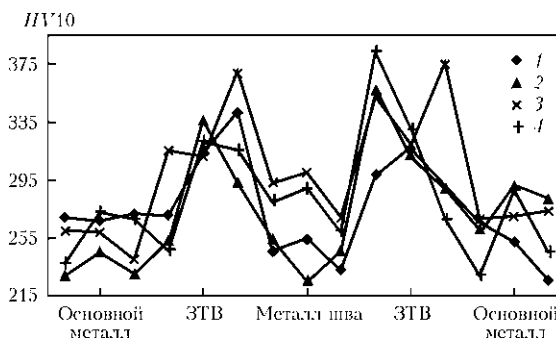


Рис. 9. Измерение твердости на верхней стороне шва: 1 — порошковая проволока F1K — угловой шов; 2 — порошковая проволока F1S — стыковой шов; 3 — проволока сплошного сечения M1K — угловой шов; 4 — проволока сплошного сечения M1S — стыковой шов

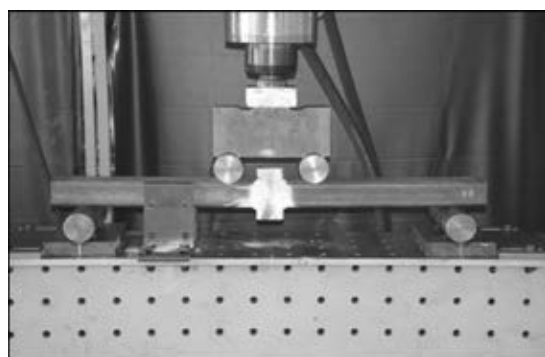
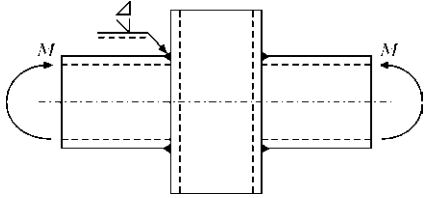
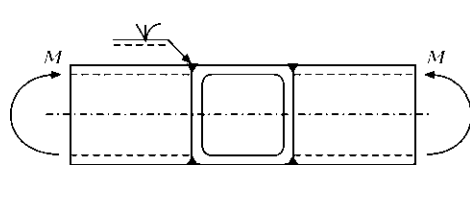


Рис. 10. Реальный процесс испытаний

Таблица 2. Схема образцов и виды нагрузок

Образцы с угловым швом	Образцы со стыковым швом
	
Сплошная проволока HV-K-M	Сплошная проволока HV-R-M
Порошковая проволока HV-K-F	Порошковая проволока HV-R-F

при произвольно взятой полосе разброса T_s ($P_u = 90\% ; P_u = 10\% = 1:1,5$ [17] вначале в форме переносимого напряжения S_0 . После этого для сравнения с рекомендациями МИС провели пересчет в размах переменного напряжения ΔS с учетом коэффициента асимметрии цикла. Образцы без надрыва, испытанные до напряжения $N = 5 \cdot 10^6$ циклов, назвали случайными и при оценке их не учитывали.

Для определения нормального номинального напряжения в качестве характеристики сечения сварного соединения с изгибающей нагрузкой предположили момент сопротивления сечения катаного профиля $W_{el} = 53,5 \text{ см}^3$ [18] после проведения контроля на реальном сечении. Необходимый далее момент изгиба M рассчитывали по геометрическим условиям четырехточечного изгиба согласно теории упругости.

Как видно из рис. 11, место начала трещины у всех образцов находится преимущественно в углах на переходе шва в связи с более высокой концентрацией напряжений, связанной с большей жесткостью детали в этом месте.

На рис. 12 приведено сравнение экспериментальных результатов с данными рекомендаций МИС. Как уже отмечалось выше, рекомендации МИС передают усталостную прочность линиями Вёлера. Под классом FAT подразумевается до-

пустимый размах номинального напряжения ΔS [МПа] в случае подреза при стационарном цикле напряжения $N = 2 \cdot 10^6$. При этом для сварных соединений установлен наклон крутопадающего участка кривой Вёлера $m = 3$.

Некоторые результаты более наглядны при дальнейшем сравнении образцов с подрезами в соответствии с рекомендациями МИС [16]. У обоих соединений наклон линии Вёлера $m = 3$. HV-шов при выполнении углового шва (HV-K-M, HV-K-F) можно приблизительно отнести к классу усталостной прочности FAT 50 (табл. 3). Сложившиеся обстоятельства еще более неблагоприятны, так как здесь в связи с меньшей жесткостью установленного в промежутке полого профиля на угловые области накладываются дополнительные напряжения (ср. надрывы на рис. 10).

HV-шов при выполнении стыкового шва (HV-R-M, HV-R-F) можно отнести к классу FAT56, если предположить, что НК подтвердил соответствующее качество корня шва (табл. 4).

Сравнение результатов НК с данными МИС приведено в табл. 5.

Хотя наклон всех полученных линий Вёлера более пологий, чем в рекомендациях МИС, точки пересечения с сопоставимыми FAT-линиями Вёлера нет из-за более высоких значений вибропрочности при $N = 2 \cdot 10^6$.

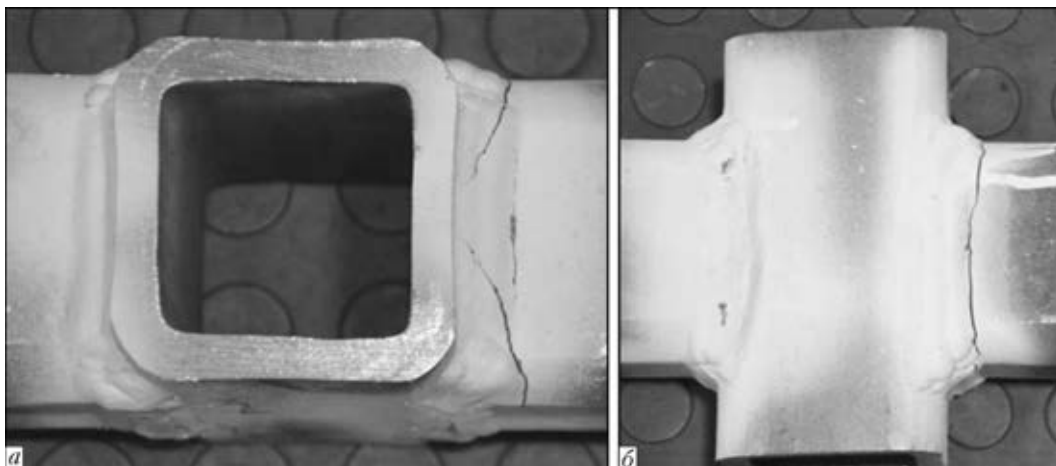


Рис. 11. Трещины на переходах швов в области углов профилей

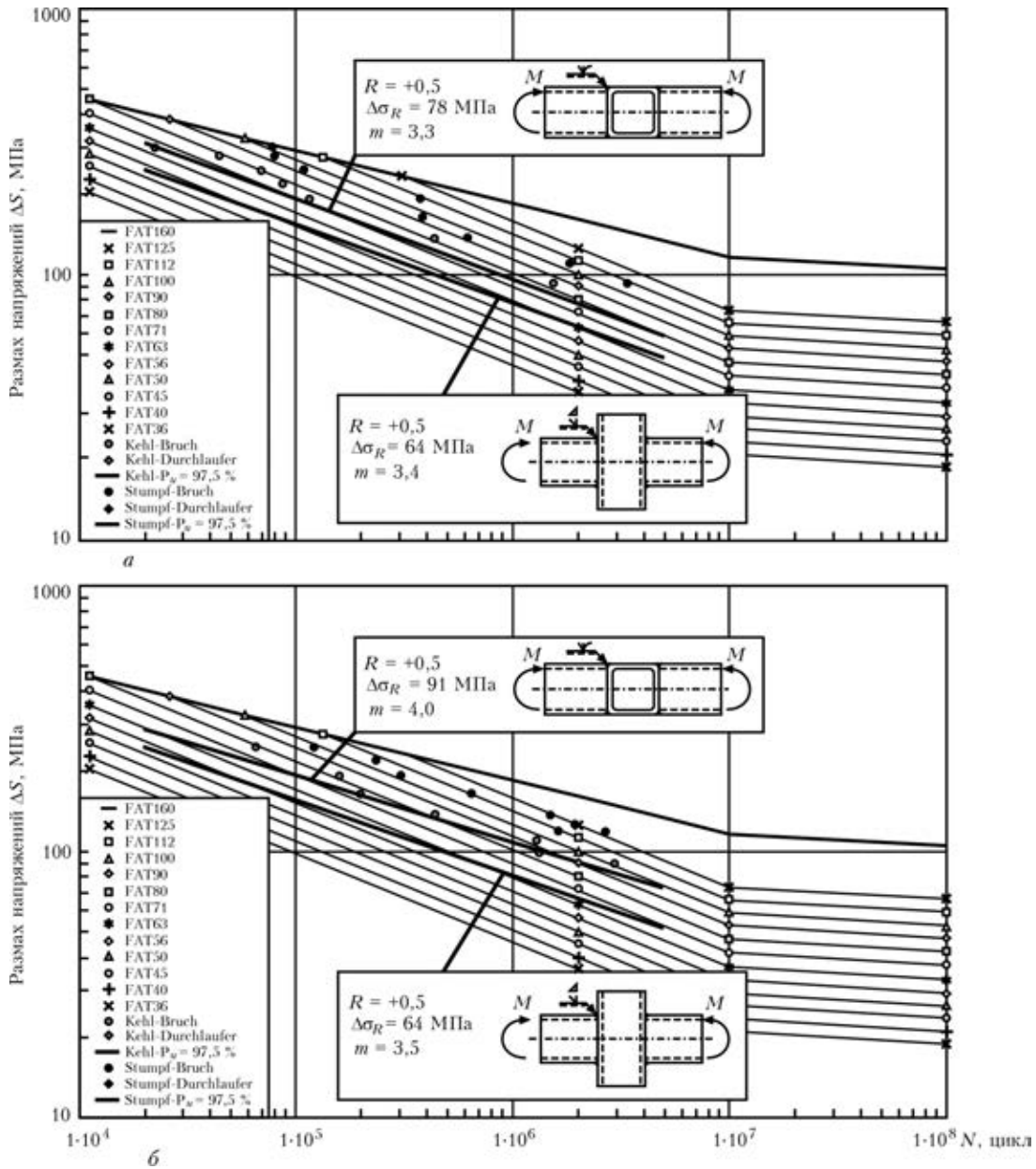


Рис. 12. Усталостные кривые для соединений, выполненных проволокой сплошного сечения (а) и порошковой (б)

Т а б л и ц а 3. Классификация FAT50 МИС для HV-шва при выполнении углового шва [16] образца № 424

Конструкция детали	Описание	Класс усталости (FAT)		Примечание
		сталь	алюми- ний	
	Сварное соединение прямоугольного полого профиля, односторонний стыковой шов, потенциальное место разрушения у границы наружной поверхности шва Толщина стенки > 8 мм Толщина стенки < 8 мм	50	20	НК швов для гарантии полного проплавления корня шва
		45	18	

Ни в малоцикловой области (краны, подкрановые пути, аппараты давления), ни в областях с многоцикловыми нагрузками усталостную прочность переоценивать нельзя. Однако следует учитывать, что в данном случае рассматривались со-

единения узлов из полых профилей (SG 69 Q) и расчет параметров велся согласно классам FAT по рекомендациям МИС.

Таким образом, применение высокопрочных улучшенных мелкозернистых конструкционных

Таблица 4. Классификация FAT56 МИС для HV-шва при выполнении стыкового шва [16] образца № 234

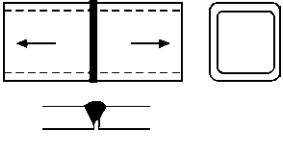
Конструкция детали	Описание	Класс усталости (FAT)		Примечание
		сталь	алюминий	
	Поперечный стыковой шов прямоугольного полого профиля, выполненный с одной стороны, полное проплавление, трещина корня шва НК корня Нет НК	56 35	25 12	Выполнено в нижнем положении

Таблица 5. Сравнение экспериментальных результатов с данными МИС

Требования МИС	ΔS , МПа	m	Маркировка образцов	ΔS , МПа	m
FAT 50	50	3,0	HV-K-M	64	3,4
			HV-K-F	66	3,5
FAT 56	56	3,0	HV-R-M	78	3,3
			HV-R-F	91	4,0

сталей во многих случаях позволяет уменьшить толщину стенки и тем самым сократить затраты на материал и обработку. Широкий диапазон прочности дает возможность ограничить размеры и массу детали с учетом условий производства и нагрузок. Только благодаря применению этих сталей в некоторых случаях удается преодолеть установившиеся границы. Выполненные сварочные эксперименты свидетельствуют о пригодности применяемых профилей. При соответствующей разделке кромок и соблюдении технологических правил можно выполнить высококачественные соединения с хорошими механическими свойствами. Испытания на усталость подтвердили возможность применения описанных профилей и для конструкций с циклической нагрузкой. Условием является соблюдение соответствующих нормативов, инструкций и рекомендаций.

1. <http://www.vmtubes.de>
2. Mueller T., Bruns C. Use of high performance rectangular hollow sections (RHS) with yield strength between 355 and 890 MPa // 23rd Intern. Ocean and Polar Eng. conf. ISOPE, Anchorage, 2013.
3. EN 10 210-1. Warmgefertigte Hohlprofile fuer den Stahlbau aus unlegierten Baestaehlen und aus Feinkornbaustaehlen. — Teil 1: Technische Lieferbedingungen.
4. Uwer D., Hohne H. Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen fuer das kaltrissichere Schweißen von Staehlen // Schweißen und Schneiden. — 1991. — Bd. Heft 5. — S. 282–286.
5. Peder C., Hart P. H. M. CTS-testing procedures: The Present position // The Welding Inst. Res. Bull., Sept., 1975. — P. 264–266.
6. Uwer D., Hoehne H. Charakterisierung des Kaltrißverhaltens von Staehlen beim Schweißen // Schweißen und Schneiden. — 1991. — Bd. Heft 4. — S. 195–199.
7. Ito Y., Bessyo K. Weldability formula of high strength steels // Related to Heat-Affected Zone Cracking. Sumitomo Search 1, May, 1969. — P. 59–70.
8. EN ISO 13916. Anleitung zur Messung der Vorwärm-, Zwischenlagen- und Haltetemperatur.
9. SEW 088. Schweißgeeignete Feinkornbaustaehle — Richtlinien fuer die Verarbeitung, besonde fuer das Schmelzschweißen. — Beiblatt 1: Kaltrissicherheit beim Schweißen; Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen. — Beiblatt 2: Ermittlung der Abkuehlzeit $t_{8/5}$ zur Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen.
10. EN 1011. Schweißen — Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe. Teil 1: Allgemeine Anleitung fuer das Lichtbogenschweißen; Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Staehlen.
11. EN ISO 14175. Schweißzusätze — Gase und Mischgase fuer das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse.
12. EN ISO 16834. Schweißzusätze — Drahtelektroden, Draehete, Staebe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Staehlen.
13. EN ISO 18276. Schweißzusätze — Fuelldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Staehlen.
14. EN ISO 15614-1. Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren fuer metallische Werkstoffe — Schweißverfahrenspruefung. — Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Staehlen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen.
15. EN ISO 5817. Schweißen — Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) — Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten.
16. Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. — Doc. IIW-1823–07. Update 12/2008.
17. Haibach E. Betriebsfestigkeit — Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2002.
18. MSH-Profilе mit kreisfoermigen, quadratischen und rechteckigen Querschnitten — Abmessungen, statische Werte, Werkstoffe. — Technische Information der Vallourec & Mannesmann Deutschland GmbH. — Duesseldorf, 2012.

Поступила в редакцию 13.05.2013