

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФАСОННОГО ПРОКАТА В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ МАЛОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Ю. Д. ЯВОРСКИЙ, канд. техн. наук, академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Л. Н. ЛОСЕВ, канд. техн. наук (Центральный НИИ строительства, г. Москва, РФ)

Приведены методики и результаты исследований несущей способности стыковых сварных соединений, подвергнутых малоциклово́й нагрузке. Даны рекомендации по повышению несущей способности сварных соединений, выполненных контактной сваркой.

Ключевые слова: циклическое нагружение, малоциклово́я нагрузка, несущая способность, граница пропорциональности, относительная деформация, контактная стыковая сварка, грат

Известно [1–3], что работоспособность сварных соединений в значительной мере определяется их усталостной прочностью, на показатели которой оказывают влияние не только пластические свойства соединений, но и макроструктура сварных швов. В связи с этим форма сварного шва при контактной сварке должна оказывать заметное влияние на усталостную прочность сварных соединений.

Конструирование прокатно-сварных элементов и совместная с ЦНИИС проектная проработка шпунтовых стенок из них показали, что прокатно-сварное исполнение стальных конструкций для строительства портовых гидротехнических сооружений, осуществляемое в заводских условиях на базе современных технологических процессов, обеспечивает широкие возможности для создания элементов новых форм и выхода на более эффективные конструктивные решения сооружений. Такие решения могут быть получены для различных условий по глубине, грунтам основания и эксплуатационным нагрузкам.

Для глубоководных причальных сооружений используются длинномерные сваи, элементы которых целесообразно сваривать контактной стыковой сваркой оплавлением. Шпунтовые стенки подвергаются специфической малоциклово́й эксплуатационной нагрузке. Данных о влиянии малоциклово́го нагружения на их несущую способность после небольшого количества циклов нагружения практически нет.

Для проведения испытаний в ИЭС им. Е. О. Патона изготовили пять образцов стыковых свар-

ных соединений фасонного проката ШДС (ТУ 14-2-566–84) для шпунта ШЗП, в том числе:

«СТ» и «КСТ» — стандартные стыковые соединения, выполненные по ТУ 35-1772–86;

«СТГ» — аналогичное стыковое соединение, но с необработанным гратом;

«СМ» — стыковое соединение, выполненное со сверхнормативным смещением (несоосностью) состыкованных отрезков проката на 2,5 мм;

«НП» — стыковое соединение с неповаренным замком.

Конструкция образцов представлена на рис. 1. Стыковые соединения выполнены контактной сваркой оплавлением на машине К-190 на следующих режимах, принятых при сварке профильного проката с такой же площадью поперечного сечения: время сварки 120 с; начальное напряжение 7 В; время оплавления на высоком напряжении 40 с; низкое напряжение 4 В; время снижения напряжения 30 с; время оплавления на низком напряжении 40 с; конечное напряжение 4,8 В; время повышения скорости 6 с; время оплавления на повышенной скорости 1,5 с; конечная скорость оплавления 1,5 мм/с; осадка 8 мм; припуск на оплавление 28 мм; вылет 120 мм; удельное давление осадки 40 МПа. При таком режиме сварки влияние деформации на ударную вязкость проявляется в меньшей степени. Более того, существенное влияние на пластические свойства оказывает изменение микроструктуры металла по линии соединения и примыкающим к ней участкам. При самой неблагоприятной микроструктуре, когда угол изгиба волокон составляет 40...60°, ударная вязкость снижается на 20...30 % [2]. При осадке, равной 8 мм, угол изгиба волокон составляет менее 40°. Усталостная прочность при контактной стыковой сварке на этом режиме составляет 95 % по сравнению с показаниями для целого рельса [2]. О несущей способности данных практически нет.

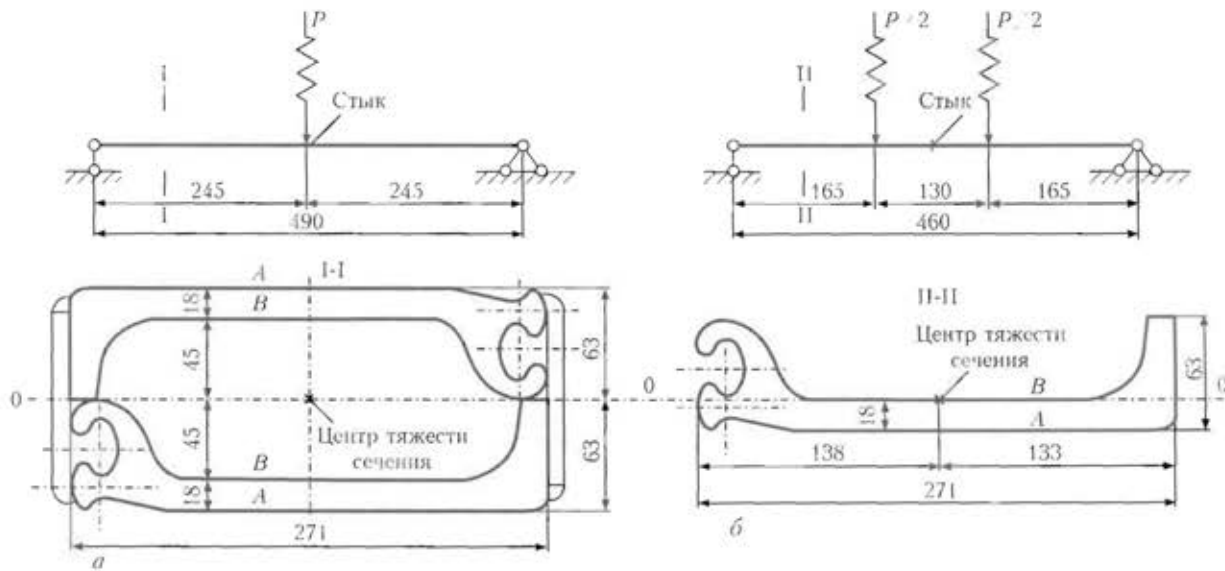


Рис. 1. Конструкция образцов и схема нагружения циклической нагрузкой при испытании спаренного образца «стг-нп» (а), образцов «ст» и «см» (б)

Задача испытаний заключалась в оценке изменения несущей способности соединений, предварительно подвергнутых циклическому нагружению переменной нагрузкой. При этом объектом исследования была несущая способность соединений на растяжение, а циклическое нагружение, происходящее вследствие колебаний нагрузки на изгибаемую стенку из шпунта ШЗП, решили воспроизводить нагружением образцов переменной нагрузкой по схеме поперечного изгиба.

Предстояло установить, снижается ли несущая способность соединений, подвергнутых циклическому нагружению, по сравнению с ее исходным уровнем и выявить влияние дефектов, воспроизведенных в стыках образцов «стг», «см» и «нп».

Для проведения испытаний необходимо было задать количество циклов нагружения и уровень нагрузки, характерные для работы шпунтовых стен в причальных сооружениях.

По нормам проектирования причальных сооружений расчет конструкций шпунтовых стен ведется на статическую нагрузку, проверка их на выносливость не производится.

Основными нагрузками, определяющими напряженно-деформированное состояние шпунтовых стен, являются давление грунта от его собственного веса (постоянная нагрузка), а также от веса складированных на причале грузов и располагаемого там технологического оборудования (длительная временная нагрузка). Отрезки времени, на протяжении которых нарастает или снижается эта нагрузка, измеряются сутками. С такой же периодичностью воздействует на сооружения кратковременная нагрузка от судов.

Малый период имеет волновая нагрузка, но для причальных сооружений, возводимых, как правило, на защищенной от волнения акватории,

она существенно ниже постоянной и длительной временной нагрузки, и ее влияние на напряженно-деформированное состояние шпунтовой стенки невелико.

Принимая во внимание приведенную выше характеристику периодичности переменных нагрузок на шпунтовые стенки, расчетную длительность цикла изменения основной нагрузки можно оценить в 2...3 сут. Поскольку у причала могут одновременно находиться и вести погрузочно-разгрузочные работы два-три судна, а нагрузка при обработке каждого из них передается и на смежные участки причальной стенки, расчетную длительность цикла сократим еще втрое, до 0,6 сут. Тогда за 35-летний период эксплуатации сооружения шпунтовые профили в причальной стенке должны воспринять до 22 тыс. циклов изменения нагрузки.

Испытуемые образцы стыковых сварных соединений профилей ШДС подвергли 25 тыс. циклам нагружения. При этом верхний уровень среднего по толщине полки значения нормальных напряжений в стыке в каждом цикле приняли равным 0,5 расчетного сопротивления стали по пределу текучести ($R_y = 235$ МПа для фасонного проката из стали ВСтЗсп по ГОСТ 380-71), а нижний — 0,5 верхнего уровня. Образец «кет» сохранили как контрольный и циклическому нагружению не подвергали. Схема нагружения образцов циклической нагрузкой приведена на рис. 1. Для циклического нагружения образцы соединили попарно — «стг-нп» и «ст-см». Предварительно стандартный хвостовой выступ профиля ШДС в образцах укоротили до 63 мм (размер, равный высоте замка).

Каждую пару образцов соединили планками (рис. 1, а) размером 100×100×10 мм, установленными на концах образцов по их боковым гра-

ням и приваренными по контуру с расчетом восприятия швами усилия среза в 209 кН, что соответствует нагрузке $P = 686$ кН на спаренный образец. Коробчатое сечение спаренного образца имеет следующие характеристики: площадь $F = 136,3$ см², центральный момент инерции $J_0 = 3089$ см⁴, момент сопротивления $W = 490$ см³.

Циклическое нагружение сваренных образцов проводили на испытательной машине «Шоппер 200» (ИЦМ-200-Пу) при частоте пульсации 300 цикл/мин.

Спаренный образец «стг-нп» подвергся 25 тыс. циклам переменной нагрузки при расположении образца «стг» в растянутой, а «нп» в сжатой зоне коробчатого сечения, а затем еще 25 тыс. циклам после переворачивания образца с целью смены местоположения «стг» и «нп».

Пределы изменения нагрузки на образец «стг-нп» и расчетных нормальных напряжений в стыках (см. рис. 1) следующие: $P = 294...588$ кН, уровень нормальных напряжений в стыке A составляет 73...147; B — 52...105 МПа. После окончания циклического нагружения образцы «стг» и «нп» разъединили разрезкой планок.

У спаренного образца «ст-см» вследствие дефекта шва крепления одной из соединительных планок произошла срезка этого шва при нагрузке на образец 619 кН, что привело к остаточной деформации хвостового выступа образца «см» и вынудило для испытания образцов «ст» и «см» циклической нагрузкой перейти на схему их отдельного нагружения (см. рис. 1, б). Характеристики корытного сечения одиночного образца следующие: площадь $F = 68,15$ см², центральный момент инерции $J_0 = 165$ см⁴, момент сопротивления растянутой зоны сечения $W = 91,5$ см³.

Циклическое нагружение одиночных образцов «ст» и «см» проводили на испытательной машине «МУП-100» при частоте пульсации 450 цикл/мин.

К каждому из образцов (см. рис. 1) были приложены 25 тыс. циклов переменной нагрузки со следующими параметрами нагружения: $P = 127...255$ кН; уровень нормальных напряжений в стыке A равен 115...230; в стыке B постоянный 0 МПа.

После испытания циклической нагрузкой определяли несущую способность образцов при растяжении по направлению нормали к плоскости стыка. Испытанию на растяжение был подвергнут также контрольный образец «кст». Образцы растягивали на испытательной машине «Шоппер 200» медленно возрастающей нагрузкой при скорости перемещения подвижного захвата 0,002...0,005 мм/с и строили диаграммы «усилие-деформации». Деформации измеряли по направлению растягивающего усилия, на линии продольной оси образцов как на внешней поверхности полки, так и со стороны корыта с помощью ме-

ханических тензометров и индикаторов перемещений, устанавливаемых на базе в 200 мм симметрично по отношению к стыковому шву. За критерий исчерпания образцом несущей способности принимали фиксируемое прибором-измерителем деформации реальное или условное проявление текучести стали в зоне стыка. Значение нагрузки, соответствующее наступлению этой фазы напряженно-деформированного состояния образца, определяли по диаграмме растяжения.

Растяжение образцов продолжали до их разрушения. Полученные значения несущей способности образцов, прошедших испытания циклической нагрузкой, сопоставляли с несущей способностью контрольного образца «кст» с целью оценки последствий специфического малоциклового нагружения. Влияние дефектов, воспроизведенных в стыковых соединениях, а также такие особенности состояния образцов, как форма разрушения, образование трещин, большие пластические деформации, выявленные в испытаниях, приведены на рис. 2 и 3. Предельно приложенная к образцу нагрузка, при которой он остался неразрушенным, составляет 1695 (для образца «кст») и 1671 кН (для образца «ст»). Образец «стг» — при нагрузке 1499 кН (вырвана часть полки с хвостовым выступом), образец «нп» разрушился при нагрузке 1519 кН (произошел обрыв полки образца у лобового шва накладки хвостовой части). К моменту разрушения раскрытия трещины у ее корня достигло 15 мм. Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, б, нагрузка, при которой относительная деформация $\epsilon = 1,36$, составляет 840 кН. В то же время на поверхности полки со стороны замка при той же относительной деформации нагрузка составляет примерно 1300 кН, т. е. отвечает данным, полученным на контрольном образце «кст». Это свидетельствует о том, что при повторных, ограниченных по количеству, циклах нагружения за пределами упругости перераспределение напряжений — деформаций может приводить к затуханию накопления пластической деформации, т. е. приспособляемости [4].

С целью обеспечения бесперебойной работы портовых гидротехнических сооружений на всем протяжении их срока службы проводится постоянный технический надзор, для предотвращения возможных повреждений и деформаций, определения объемов, сроков и способов необходимых ремонтов, оценки долговечности отдельных конструктивных ремонтов. Для проведения комплексных исследований необходимо собрать максимально возможный объем информации о сооружении, а также ознакомиться с результатами натурных исследований отдельных образцов, выполненных не ранее чем за три года до проверки,

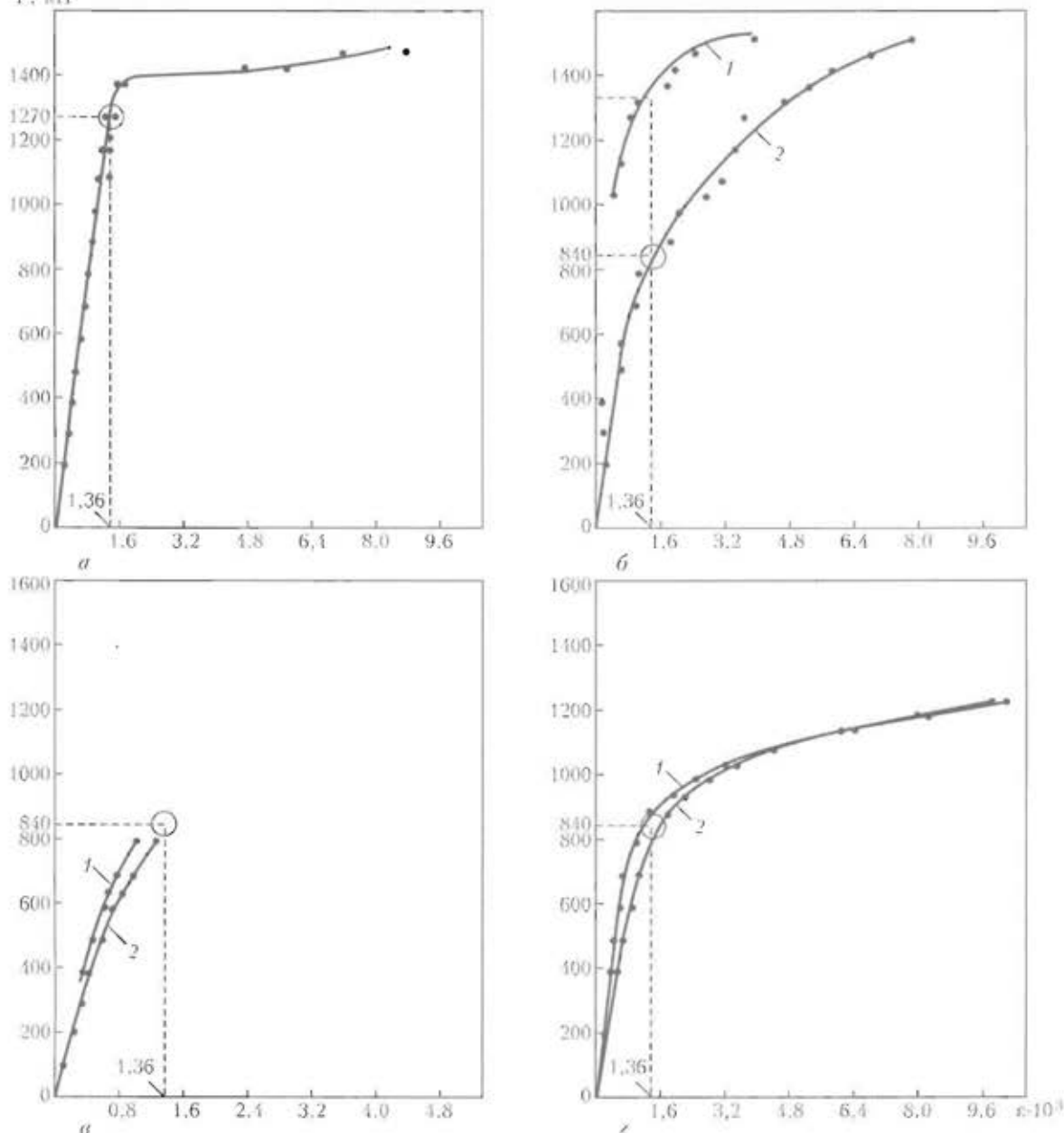


Рис. 2. Диаграммы растяжения образцов стыковых соединений: а — «кет»; б — «ст»; в — «стг»; з — «шп»; 1 — поверхность полки со стороны замка В; 2 — тыльная поверхность полки А. База измерения деформации 189 (а, б, з) и 200 мм (в), средство измерения — индикатор перемещений (1 дел. — 0,01) (а, б, з) и механический тензометр (1 дел. — 0,001 мм) (в)

и результатами наблюдений за сооружением с момента его постройки.

Предельно допустимое перемещение, определяемое по данным, полученным на образце «ст» ($\epsilon = 1,36$), соответствует нагрузке 1270 кН. Предельные нагрузки, по которым определяется статическая несущая способность, могут соответствовать предельно допустимым перемещениям, разрушению или исчерпанию несущей способности сечения, когда при малом увеличении нагрузки резко возрастает деформация, что может ограничивать статическую несущую способность. Предельные нагрузки в этом случае определяют из условий перехода сечения образца целиком в пластическое состояние. Расчет с учетом исчер-

пания статической несущей способности по деформациям широко используют для многих строительных конструкций. Как видно из рис. 2, б, для образца «ст» предельно допустимому перемещению $\epsilon = 1,36$ соответствует две нагрузки — 840 и 1300 кН. Если предельно допустимые значения деформаций выше значения деформаций, соответствующих достижению предела текучести, то это характеризует возрастание несущей способности благодаря упругопластическому перераспределению напряжений в процессе деформирования (приспособляемость).

Если трудно установить, какое из ограничений по перемещению или разрушению даст меньший запас прочности, то приходится определять два

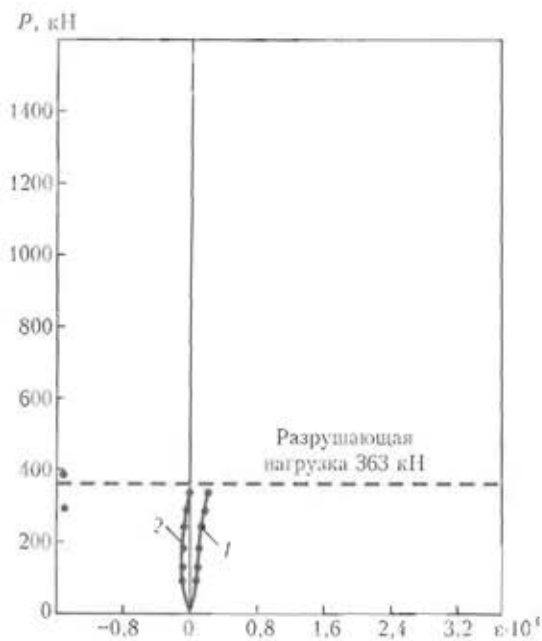


Рис. 3. Диаграмма растяжения образца «см» (разрушение хрупкое, после циклического нагружения образец получил остаточный прогиб 30 мм). База измерения деформации 200 мм, средство измерения — механический тензомер; 1, 2 — то же, что и на рис. 2

запаса прочности и выбирать для расчета меньший, который соответствует нагрузке 840 кН. Соотношение показаний данных на образцах «кст» и «ст» 420/1270 кН и составляет примерно 30 %.

Данные, полученные при испытаниях образца «стг», свидетельствуют о том, что грат является инициатором снижения несущей способности и

его следует убирать в сварных соединениях, а степень влияния непроваренного замка в шпунте (образец «нп») — о зависимости начала трещины от места расположения. Такой дефект является инициатором протяженной трещины. При ширине трещины более 1 мм за наблюдением процесса ее развития устанавливают маяк. Наиболее опасным дефектом при контактной стыковой сварке является отклонение от их соосности, о чем свидетельствуют данные, приведенные на рис. 3 (образец «см»).

Таким образом, малоцикловая нагрузка снижает несущую способность зетовых шпунтов, стенки которых сварены контактной сваркой оплавлением примерно на 30 %. Грат в соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой, может являться инициатором снижения их несущей способности и его следует убирать. Непроваренный замок в поясах зетовых шпунтов обуславливает развитие протяженных трещин. Нарушение соосности при контактной стыковой сварке является недопустимым дефектом.

1. Астис А. Е., Кучук-Яценко С. И. Статическая и вибрационная прочность соединений из прокатных профилей большого сечения, выполненных контактной сваркой // Автомат. сварка. — 1960. — № 12. — С. 14–21.
2. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1975. — 211 с.
3. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
4. Макутов Н. А. Статистические закономерности малоциклового разрушения. — М.: Стройиздат, 1971. — 171 с.

Procedures and results of investigation of the load-carrying capacity of butt welded joints subjected to low-cycle loading are presented. Recommendations are given on improvement of the load-carrying capacity of welded joints made by flash-butt welding.

Поступила в редакцию 11.12.2007