



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Д. ГОРБАЧ, О. Г. СОКОЛОВ, В. С. МИХАЙЛОВ, доктора техн. наук
(ЦНИИТС, г. С.-Петербург, РФ)

Рассмотрены факторы, определяющие циклическую прочность и долговечность сварных судостроительных конструкций. Даны расчетные оценки сварочных деформаций на примере корпуса танкера и катамарана. Показаны направления снижения местных и общих деформаций, стабилизации формы и точности сварных конструкций путем их низкочастотной вибрационной обработки. Приведены примеры использования принципиально новых типов сварных соединений на базе высококонцентрированных источников энергии и адаптивных методов сварки.

Ключевые слова: сварочная деформация, концентрация напряжений, циклическая прочность, лазерные технологии, адаптивные методы сварки, геометрическая и технологическая адаптация, сотовые панели

Сварные конструкции судов, морских судовых платформ, глубоководной техники при эксплуатации подвержены нестационарным знакопеременным нагрузкам. Ветроволновые воздействия, а также значительное давление, оказываемое на сварные соединения ледовыми полями в арктических районах Мирового океана, в ряде случаев являются источниками разрушения отдельных элементов конструкций, что может привести к аварийным ситуациям. Эти обстоятельства требуют очень тщательного подхода к учету всех внешних воздействий, а также внутренних факторов, в той или иной степени лимитирующих зарождение и характер развития усталостных трещин в сварных конструкциях [1–5].

Согласно такому подходу полный ресурс N сварного соединения определяется долговечностью до возникновения усталостной трещины N_i и долговечностью N_c , отвечающей периоду развития трещины до ее критического размера $a_{кр}$:

$$N = N_i \{ \alpha_\sigma, K_\epsilon, \sigma_a^i(x, y) \} + N_c \{ a_0, a_{кр}(t, \sigma_{ост}(x, y), \sigma_a^i(x, y)) \},$$

где α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений; σ_a — местные значения амплитуды действующих напряжений; i — показатель степени, определяемый экспериментально; x, y — координаты; $a_0, a_{кр}$ — соответственно начальный и критический размер трещины; K_ϵ — коэффициент концентрации деформаций, характеризующий дефект либо особенности геометрии сварного соединения; $\sigma_{ост}$ — остаточные сварочные напряжения.

Сварочные деформации и напряжения, включающие общие и местные деформации и остаточные напряжения, оказывают существенное влияние на качество, работоспособность и трудоемкость изготовления сварных конструкций, в том числе и судокорпусных.

Остаточные напряжения негативно влияют на долговечность конструкций, циклическую и коррозионно-механическую прочность, коррозионное и эрозивное состояние корпуса судна [5].

В связи с изложенным выше в ЦНИИ технологии судостроения (ЦНИИТС) велись многолетние теоретические и экспериментальные исследования процесса образования и прогнозной оценки сварочных деформаций и напряжений, на основе которых разработаны конструктивные и технологические мероприятия по предупреждению и снижению возникающих деформаций и напряжений [2, 3].

Расчетная оценка сварочных деформаций и напряжений. Расчет базируется на теории распространения тепла при сварке, основах строительной механики и теории упругости. Однако применяемые методы расчета сварочных деформаций созданы только применительно к простейшим сварным конструкциям (тавровым балкам, полотнам с ребрами жесткости, секциям корпусов, трубным элементам и др.). На основе обобщений, выполненных специалистами других предприятий, своих собственных исследований и разработок в ЦНИИТС разработан отраслевой стандарт ОСТ 5.9807–80, регламентирующий методы определения и предотвращения остаточных сварочных деформаций. Принятые в нем методы учитывают сложный характер образования сварочных деформаций, на который влияет три группы факторов, условно названных тепловыми, физическими и геометрическими. Методы достаточно точно учитывают влияние режимов и последовательности сварки, а также теплофизических характеристик свариваемых и присадочных материалов. Наиболее сложным является учет влияния геометрического фактора на величину деформаций (формы, размеров и массы элементов конструкции), а также условий закрепления элементов и конструкции в целом [4].

Для прогнозирования образования и накопления сварочных деформаций при изготовлении сложных пространственных конструкций (секций, блоков и корпусов судов в целом) в ЦНИИТС при участии специалистов ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в последние годы выполнен комплекс исследований и разработан расчетный метод, ос-

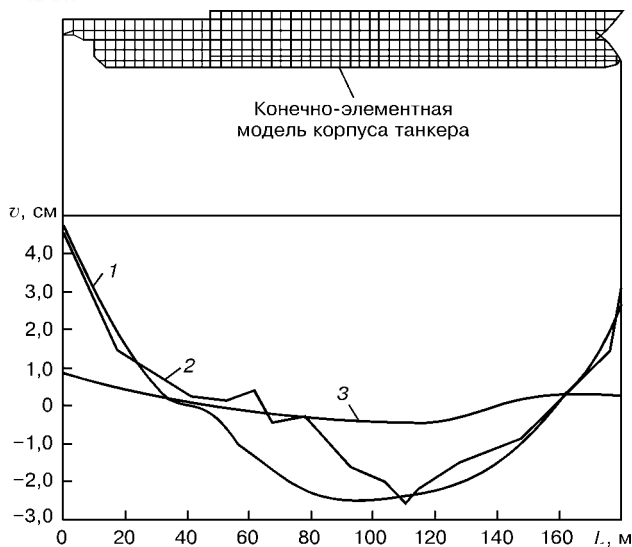


Рис. 1. Результаты расчета общего изгиба корпуса танкера: 1 — расчетный при существующей схеме формирования корпуса; 2 — фактический килевой линии корпуса; 3 — расчетный при компенсации сварочных деформаций; v — стрелка прогиба судна; L — длина балки

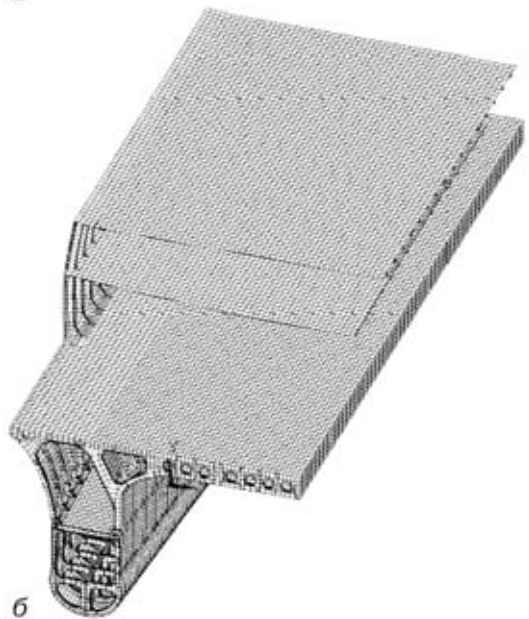
нованный на теории сварочных деформаций и методе конечных элементов (МКЭ). При расчетах по указанному методу на основании тепловых процессов при сварке определяются эквивалентные продольные и поперечные силы, воздействующие на конструкцию, а сами конструкции аппроксимируются пластинчато-стержневыми конечными элементами (КЭ) с шестью степенями свободы в узле. Деформации определяли с учетом технологической последовательности сборки и сварки, массы элементов конструкции, реакций и просадок стальной опор (при сборке корпуса на стапеле), жесткости конструкции и способа закрепления свариваемых элементов (прихватками или гребенками) и др. Расчеты деформаций производили с применением программы ANSYS на ЭВМ Pentium-III. Отработка методического подхода определения остаточных сварочных деформаций осуществлялась на секциях, блоках и корпусе танкера, катамарана, а также при расчете деформаций, возникающих в результате вварки деталей насыщения в сферические и цилиндрические конструкции.

При моделировании танкера количество КЭ на блоках достигло 1,5 тыс., а на корпусе в целом — около 5 тыс. Аппроксимация корпуса танкера совокупностью пластинчатых и стержневых КЭ, а также результаты расчетов общего изгиба корпуса приведены на рис. 1 [4].

Кривая изгиба на рис. 1 показывает, что при формировании корпуса, как правило, происходит подъем его носовой и кормовой частей, а средняя часть опускается ниже основной плоскости (происходит просадка). Отсюда следует, что основные силы поддержания корпуса на стапеле сосредоточены в средней его части. Легко спрогнозировать, что при спуске судна на воду из-за перераспределения сил поддержания корпуса на воде и на стапеле происходит дополнительный изгиб корпуса судна. Расчетная методика позволяет оценить возможное изменение упругой линии корпуса после спуска и, следовательно, назначить мероприятия



а



б

Рис. 2. Деформации, возникающие при установке и приварке секции главной (а) и верхней (б) палубы катамарана

по компенсации деформаций при формировании корпуса на стапеле с учетом дополнительных изменений упругой линии корпуса после спуска судна на воду.

На рис. 2 показаны деформации, возникающие при приварке главной и верхней палуб катамарана. Видно, что при выполнении сборочно-сварочных работ происходит разворот корпусов катамарана как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Установка секций и блоков с соответствующими упреждающими наклонами позволяет уменьшить отклонение формы и размеров катамарана от проектных.

Важной является задача определения местных деформаций, возникающих при вварке деталей насыщения в сферические и цилиндрические конструкции. На рис. 3 показана конечно-элементная модель сферической конструкции. Расчет сварочных деформаций с применением МКЭ позволяет получать информацию о перемещении любой точки конструкции. На рис. 4 показано распределение



перемещений точек сферической конструкции и деталей насыщения. Произведен анализ взаимного влияния деталей насыщения на перемещение относительно друг друга. Сравнение деформаций центральной детали для разных технологических этапов, а также для варианта установки и сварки платформ показано на рис. 5. Анализ данных, приведенных на рисунке, показывает, что сварка верхней детали насыщения на перемещение центральной детали оказывает существенное влияние на деформации, тогда как влияние наличия или отсутствия платформ незначительно. Выполнить подобные расчеты с применением классических методов строительной механики невозможно.

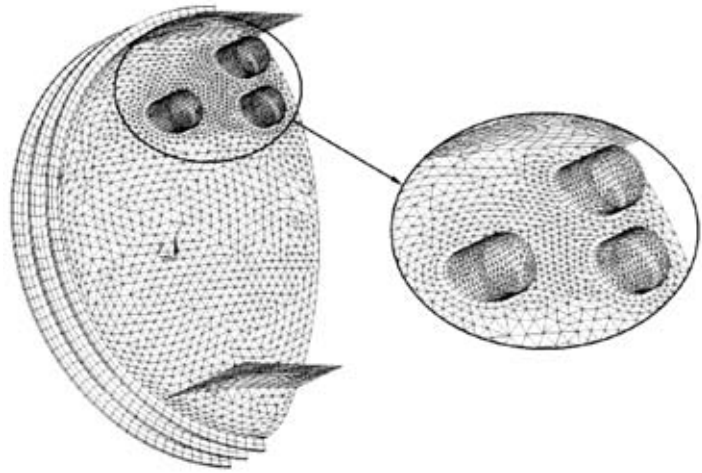


Рис. 3. Конечно-элементная модель сферической конструкции с деталями насыщения

С целью сокращения трудоемкости сбора и ввода исходных данных для расчетов деформаций секций, блоков и корпуса целесообразно использовать информацию, взятую из существующих на судостроительных предприятиях систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства.

Снижение остаточных напряжений.

Для снижения остаточных напряжений, стабилизации формы и размеров конструкций в судостроении и других отраслях промышленности применяют термообработку, являющуюся весьма трудоемкой и дорогостоящей операцией. В качестве альтернативного процесса в судостроении и других отраслях промышленности применяется низкочастотная виброобработка конструкций [6, 7].

Указанный способ снижения остаточных напряжений основан на использовании энергии вынужденных колебаний, возникающих под действием периодических динамических нагружений. При колебании конструкции возникают знакопеременные напряжения. В случае совместного действия знакопеременных и остаточных напряжений в металле интенсифицируется фазоструктурная стабилизация, происходит разукрупнение структуры, протекают микропластические деформации и другие процессы, которые приводят к снижению остаточных напряжений, стабилизации формы и размеров конструкции в целом. Установлено, что степень снижения остаточных напряжений зависит от амплитуды колебаний, длительности обработки, свойств металла, степени жесткости конструкции, технологии виброобработки и других факторов [7].

Наиболее интенсивно остаточные напряжения снижаются при виброобработке конструкций в условиях резонанса, когда резко возрастает амплитуда вынужденных колебаний из-за приближения или совпадения частот собственных колебаний конструкции с частотой внешнего воздействия на нее.

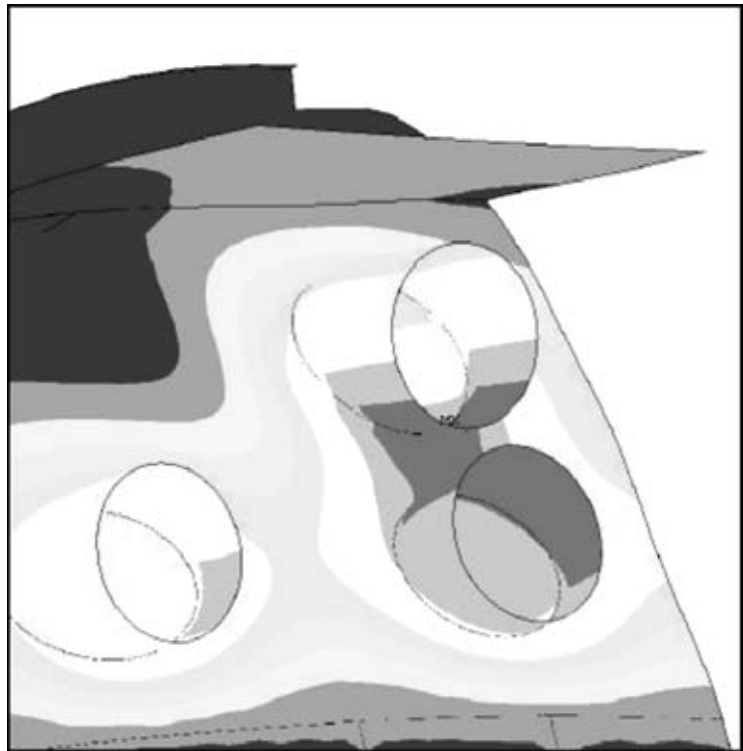


Рис. 4. Картина распределения перемещений, возникающих в результате выполнения сборочно-сварочных работ, по поверхности сферической конструкции и деталей насыщения

Для простейшей балки частота собственных колебаний определяется следующей зависимостью:

$$W = \frac{\pi^2 n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}},$$

где $n = 1+3$ — номера типа собственных колебаний; L — длина балки; EJ — изгибная жесткость; m — масса единицы длины балки.

С увеличением n упругая линия колебаний балки разбивается на количество полуволн и изменение упругой линии достаточно хорошо аппроксимируется синусоидальной функцией. В соответствии с формой изгиба балки распределяется из-

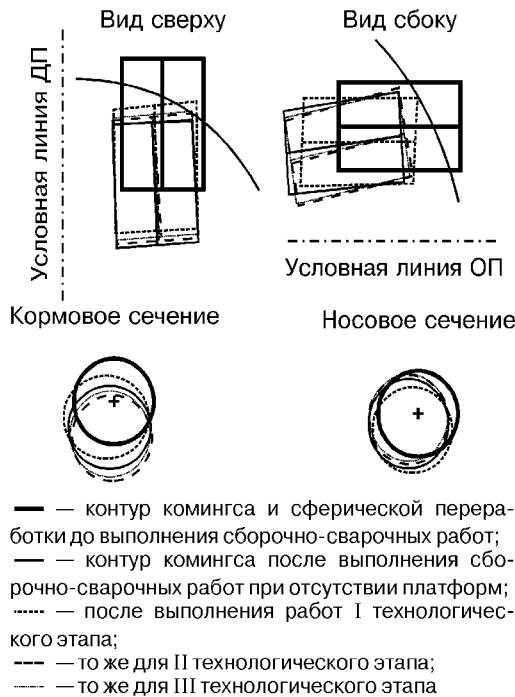


Рис. 5. Сравнение перемещений центрального комингса, возникающих на разных технологических этапах и при разных схемах сборки (ДП, ОП — соответственно диаметральной и основная плоскость)

гибающий момент и соответствующие ему напряжения, возникающие при изгибе.

При первой форме изгиба максимальные напряжения находятся в средней части балки, при второй — на одной четверти длины балки от ее концов и т. д. В связи с этим для обеспечения равномерности снижения напряжений виброобработку конструкции производят на двух-трех резонансных частотах.

Выполненный в ЦНИИТС комплекс исследований и опыт внедрения низкочастотной виброобработки на ряде судостроительных заводов показали, что этот способ позволяет снизить остаточные напряжения в стальных сварных и литосварных конструкциях до 60...65, в алюминиевых — до 70...75, в титановых — до 60...65 %.

Для снижения остаточных напряжений виброобработку конструкций производят в свободном состоянии, а для стабилизации их формы и размеров — в закрепленном (на оснастке, постелях или стапель-кондукторах). Возможно спаривание аналогичных конструкций в процессе изготовления и последующей виброобработки.

Для возбуждения механических колебаний судовых конструкций применяют переносные виброустановки, состоящие из вибровозбудителя и пульта управления (рис. 6).

С помощью низкочастотной виброобработки можно стабилизировать структуру и снизить остаточные напряжения в конструкциях из различных по химическому составу материалов, исключить ряд операций (очистку от окалины после термообработки, возможную правку конструкции и др.), кроме того, в сотни раз уменьшить затраты энергии, снизить трудоемкость и длительность про-



Рис. 6. Виброустановка и прибор для измерения напряжений

цесса, а следовательно, стоимость работ в целом, улучшить экологическую обстановку.

Поверхностное упрочнение и перераспределение напряжений в сварных соединениях. Как известно, в любом сварном соединении возникают остаточные сварочные напряжения. При этом вдоль сварного соединения, как правило, образуются остаточные сварочные напряжения растяжения. Последние уравниваются напряжениями сжатия, распределяющимися по обе стороны от сварного соединения. По мере удаления от оси сварного шва наблюдается постепенное снижение их значений. Значения продольных напряжений обычно довольно высокие и могут достигать значения предела текучести материала. Наряду с продольными в сварном соединении образуются и поперечные напряжения. При сварке деталей в свободном состоянии они уравниваются в самом соединении. В поверхностном слое и зоне термического влияния (ЗТВ) возникают напряжения растяжения, имеющие достаточно большие значения [5-7].

Таким образом, в зоне сварного соединения как в продольном, так и в поперечном направ-

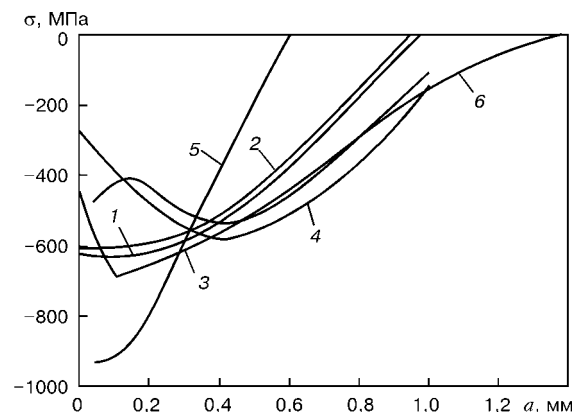


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях металла в зависимости от способа и режимов обработки: 1 — обработка пневмомолотком; 2-4 — ультразвуковым молотком мощностью соответственно 500, 800 и 1100 Вт; 5 — дробеструйная ($t = 15$ с); 6 — накатка; a — глубина упрочнения слоя

лениях действуют значительные остаточные напряжения растяжения. Для уменьшения их отрицательного воздействия на конструкцию во многих отраслях промышленности применяют различные способы снижения и перераспределения остаточных напряжений, т. е. замены в поверхностных слоях сварных соединений напряжений растяжения на напряжения сжатия. К ним относится обработка взрывом, обработка пневмомолотком, обкатка роликом, наклеп дробью, ультразвуковым пучковым молотком и пр. Выбор способа обработки для снижения или перераспределения напряжений зависит от условий производства, вида продукции, наличия оборудования и пр.

В судостроении в основном применяется дробеметная обработка, пневмомолотком или ультразвуковым пучковым молотком и пневмощетками. В ЦНИИТС выполнен комплекс исследований с целью определения влияния способа и технологии обработки на степень снижения или перераспределения напряжений. На рис. 7 приведены примеры распределения остаточных напряжений сжатия по глубине обрабатываемых стальных листов в зависимости от способа и длительности обработки, размеров используемой для этого дроби и давления воздуха в дробеметном агрегате, мощности пневматического молотка и режимов специальной установки для поверхностного упрочнения сварного соединения с использованием ударного воздействия игловых ударников на ультразвуковой частоте (рис. 8).

В процессе поверхностного упрочнения исследовано изменение ширины зоны упрочнения стыкового и углового соединений, степени поверхностного упрочнения, конструктивных элементов концентраторов напряжений (стыковое и тавровое сварные соединения, приварка элементов насыщения). С целью определения оптимальной зоны обработки проведены испытания стыковых образцов шириной полосы упрочнения до 70 мм. На рис. 9 приведены результаты усталостных испытаний, на основании которых следует, что поверхностное упрочнение сварных швов позволяет повысить циклическую долговечность конструкции в 2...3 раза. С увеличением ширины полосы упрочнения коррозионно-усталостная прочность стыковых соединений возрастает до определенного значения. Дальнейшее увеличение ширины зоны упрочнения на повышении коррозионно-усталостной прочности не сказывается. В связи с этим ширина зоны упрочнения должна перекрывать ЗТВ после сварки и составлять около 60 мм на одну сторону от сварного соединения, что вполне достаточно для достижения необходимого эффекта. Аналогичные результаты получены при испытании конструкций на коррозионную и коррозионно-механическую стойкость.

ЦНИИТС с участием других предприятий разработал и выпускает оборудование для поверхностного упрочнения, в том числе пучковые пневматические и ультразвуковые молотки, дробеметные установки и др.

Проблемы конструктивно-технологического совершенствования сварных судостроительных конструкций. Продление ресурса и надежности

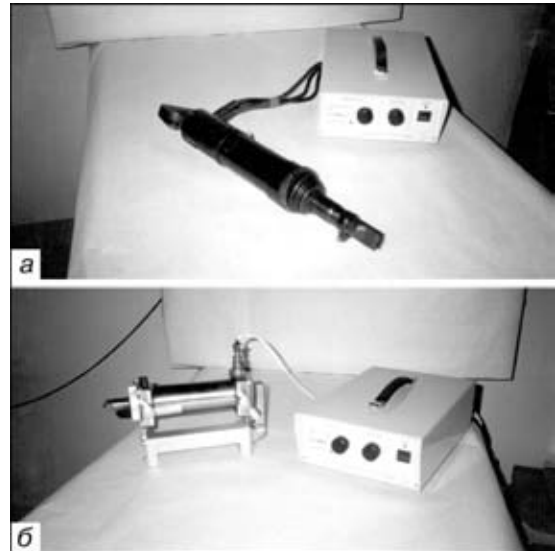


Рис. 8. Установка для упрочняющей обработки сварных соединений на ультразвуковой частоте: *a* — ультразвуковой молоток; *b* — ударное устройство для обработки поверхности деталей трением

корпусов судов и морских сооружений возможно не только путем релаксации местных остаточных напряжений. Не менее эффективным является использование с этой целью способов сварки на базе высококонцентрированных источников энергии. Так, применение лазерных, электронно-лучевых и тонкоплазменных технологий при операциях разделки, сварки и обработки металла обеспечивает резкое снижение уровня реактивных сварочных напряжений в конструкциях, а также практически исключает возникновение остаточных напряжений в результате операций подгонки и правки.

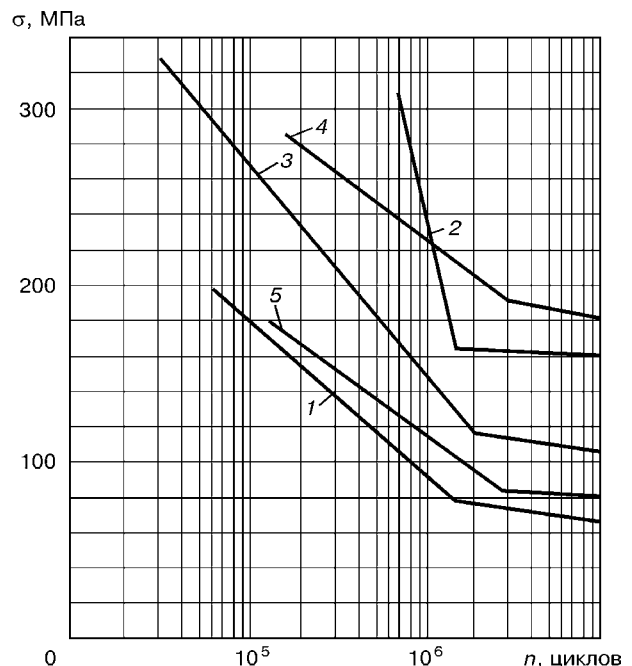


Рис. 9. Кривые усталости стали, подвергнутой различным способам поверхностной обработки: *1* — без обработки; *2-4* — дробеструйная обработка ($P = 0,50$ МПа, $t = 60$ с; $3 - P = 0,55$ МПа, $t = 5$ с; $4 - P = 0,55$ МПа, $t = 15$ с); *5* — индукционный нагрев

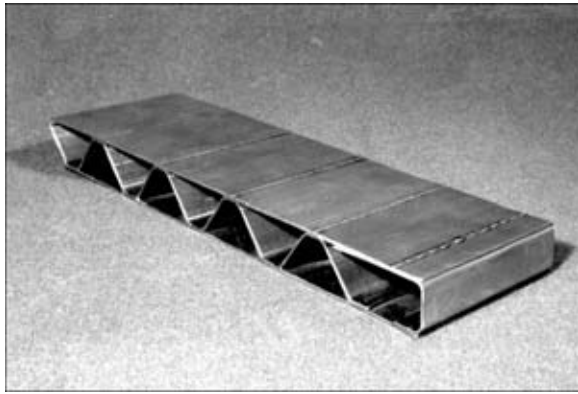


Рис. 10. Пример конструктивного исполнения сотовой панели

В ЦНИИТС совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом разработаны конструктивные решения, технология изготовления, а также проведены испытания сотовой панели (рис. 10) на базе компьютеризированной лазерной технологии [8].

Исследования ЦНИИТС и ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова показали, что применение указанных панелей не только обеспечивает эксплуатационный ресурс кораблей и судов, но и существенно снижает массу конструкций, трудоемкость и сроки их строительства (рис. 11).

В ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ЦНИИТС в 2001 г. выполнены исследования средств и методов наблюдения за формой стыка при сварке деталей судокорпусных конструкций.

На базе анализа и оценки конструкций систем технического «зрения» проведен выбор способа сбора и обработки исходной информации для управления сварочным инструментом. С целью построения системы технического «зрения» для сварочного автомата был выбран метод «светового сечения» с последующей обработкой с помощью триангуляционной процедуры. Выполнена разработка модуля оптического видеосенсора для сварочных автоматов, оснащенных системами геометрической и технологической адаптации.

Лазерный щелевой излучатель и цифровая видеокамера имеют небольшие габариты, и тем самым обеспечивается их возможность размещения вблизи сварочной головки. Блок видеосенсора жестко свя-

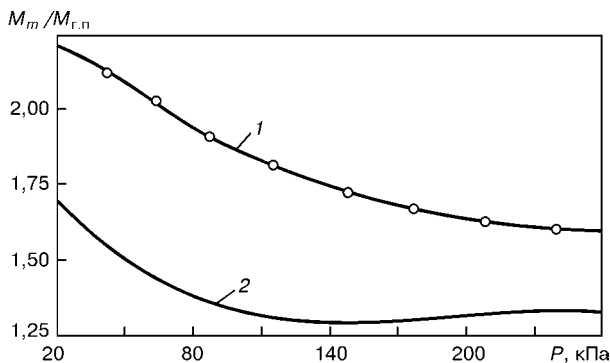


Рис. 11. Отношение массы перекрытия M_m , спроектированного на основе традиционной технологии, к массе перекрытия $M_{r.n}$, созданного с использованием сотовых (гофрированных) панелей без заполнителя, при различных уровнях расчетной нагрузки P на перекрытие: 1 — сталь Д40; 2 — РСД32

зан с транспортным модулем автомата. Это позволяет иметь фиксированные координаты для формируемой с помощью модуля оптического видеосенсора геометрической модели сварного соединения. Относительно этих же координат задаются векторы скоростей и значения корректирующих перемещений исполнительных механизмов. Скорость обработки информации в несколько раз превосходит наибольшие значения скорости сварки (перемещения транспортного модуля). Это исключает возникновение каких-либо проблем, связанных с использованием модуля видеосенсора даже в условиях высокоскоростных способов дуговой сварки. Такая система полностью решает все задачи геометрической и технологической адаптации.

Результаты исследований показали, что она весьма высокая. При условии использования современных аппаратных и технических средств для приводов исполнительных механизмов это позволяет параллельно с решением проблемы гарантированного уровня качества сварки решить проблему ресурсосбережения. Расчеты показали, что только благодаря снижению размеров выпуклости сварного шва экономится от 12 до 20 % сварочных материалов и электроэнергии. Рассмотренный процесс сварки выполняется в режиме «безлюдной технологии». С помощью автоматов с адаптивными системами управления эффективно решаются проблемы облегчения условий труда сварщиков. В настоящее время выполняется рабочее проектирование автомата, предназначенного для сварки по способу «поперечная горка». Особенность этого варианта технологии состоит в том, что путем сканирования по схеме, приведенной на рис. 12, за один проход обеспечивается формирование шва на полное сечение разделки шва.

Данная технология используется в судостроении России и имеет следующие преимущества: возможность выполнения сварки во всех пространственных положениях, в том числе неповоротных

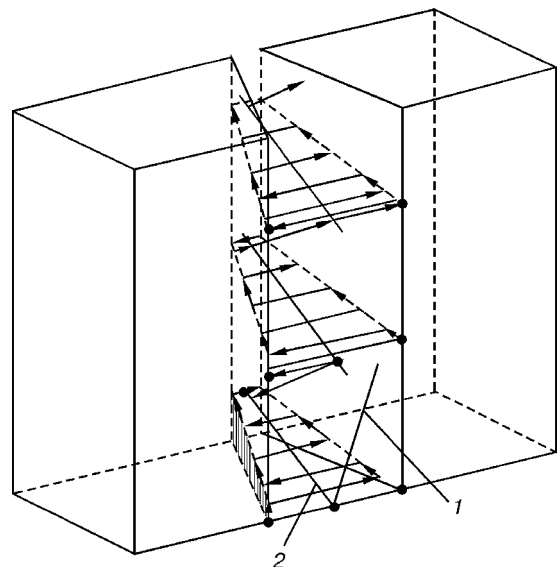


Рис. 12. Схема сканирования сварочным инструментом при сварке по способу «поперечная горка»: 1 — исходное положение инструмента до начала сварки; 2 — биссектриса угла разделки кромок



стыков при радиусе кривизны более 2 м; возникновение меньших по сравнению с многопроходной сваркой угловых деформаций; возможность выполнения сварки широкого диапазона марок сталей и сплавов, включая сплавы на основе титана; расширенный по сравнению с другими технологиями диапазон допустимых размеров зазора (допуск составляет ± 4 мм). Все перечисленные достоинства создаваемого автомата позволяют использовать его в условиях, при которых для механизации или автоматизации сварки требуется применение манипуляторов или вращателей.

1. *Расчетное* определение долговечности сварных соединений с учетом влияния технологических регистров // И. В. Горынин, Н. В. Ильин, В. П. Леонов, О. Г. Соколов // Судостроит. пр-сть. Сер. Материаловедение. Сварка. — 1990. — Вып. 10. — С. 3–14.
2. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1984. — 283 с.
3. *ОСТ 5.9807–80.* Корпуса металлических судов. Методы определения и предотвращения сварочных деформаций. — Введ. 1980.

4. *Алферов В. И., Михайлов В. С.* Математическое моделирование процесса накопления сварочных деформаций при изготовлении конструкций танкера с применением метода конечных элементов // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 1996. — Вып. 3 (287). — С. 36–43.
5. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. — С.-Петербург: Политехника, 1993. — 390 с.
6. *Низкочастотная* виброобработка конструкций и поверхностное упрочнение сварных соединений — эффективные процессы снижения и перераспределения остаточных напряжений // В. С. Михайлов, В. Д. Горбач, В. П. Стеганцев и др. // Вест. технологии судостроения. — 1999. — № 5. — С. 38–43.
7. *Перспективы* применения новых архитектурно-технических решений корпусов судов, изготавливаемых с использованием высококонцентрированных источников энергии // О. Г. Соколов, Г. З. Марголин, В. Н. Левшаков, А. А. Васильев // Материалы междунар. конф. «Сварка и родственные технологии», С.-Петербург, 2001 г. — Т. 1. — С.-Петербург: СПб. ГРУ, 2002. — С. 21–25.
8. *Адаптивное* управление технологическим процессом сварки — путь обеспечения высокого качества и надежности сварных конструкций ответственного назначения // В. Д. Горбач, И. В. Суздалев, Р. Ф. Паникаровский, Ф. Н. Нислевский // Там же. — С. 12–26.

Factors are considered, which determine the cyclic strength and fatigue life of shipbuilding welded structures. Design evaluations of welding deformations are given for the case of the hull of a tanker and catamaran ship. Methods to lower the local and total deformations, stabilization of the shape and accuracy of welded structures through their low-frequency vibration treatment are outlined. Examples are given of using fundamentally new types of welded joints, based on high-energy density sources and adaptive welding processes.

Поступила в редакцию 28.03.2003