

А.А. БЕЛОЗЁРОВ<sup>2</sup>, М.М. БОНДАРЬ<sup>1,2</sup>, В.А. МАНУХИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> ООО «Нева Технолоджи», Санкт-Петербург

## ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ БАЗОВОГО ЯДРА МЕТОДИКИ ПОСТРОЙКИ СУДОВОГО КОРПУСА В ЧИСТЫЙ РАЗМЕР

Разработаны методики оценки точности работы машин газоплазменной резки, замеров деталей и сварных секций произвольных форм и сложности. Начаты работы по измерению сварочных деформаций листовых конструкций на предприятиях судостроительной промышленности.

**Ключевые слова:** судометрика, метрология, сварочные деформации, метод конечных элементов, чистый размер.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Белозёров А.А., Бондарь М.М., Манухин В.А. Подход к разработке базового ядра методики постройки судового корпуса в чистый размер. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 53–58.

УДК 629.5.011:629.5.023

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-53-58

A.A. BELOZEROV<sup>2</sup>, M.M. BONDAR<sup>1,2</sup>, V.A. MANUKHIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya str. 3, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> “Neva Technology”, Novooovsyannikovskaya str., 17, letter A, St. Petersburg, Russia

## APPROACH TO DEVELOPMENT OF THE CORE METHOD FOR CONSTRUCTION OF SHIP HULL TO FINISHED SIZE

Methods for estimating the accuracy of flame cutting equipment, measurement of parts and welded sections of arbitrary shapes and complexity are developed. Efforts to measure deformations of plate structures at shipyards have been started.

**Key words:** ship metrics, metrology, welding deformations, finite element method, finished size.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Belozerov A.A., Bondar M.M., Manukhin V.A. Approach to development of the core method for construction of ship hull to finished size. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 53–58 (in Russian).

UDC 629.5.011:629.5.023

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-53-58

### Введение

Судостроительная промышленность в России на данный момент переживает очевидный и закономерный подъем. В первую очередь это касается создания надводных и подводных кораблей, ледоколов и прочих специализированных судов. Повсеместно на верфях закупается новое оборудование, вводятся в эксплуатацию линии, и даже открываются крупные верфи, например ООО «Судостроительный комплекс «Звезда» в г. Большой камень. Однако современные реалии требуют не только новых производственных мощностей, но и нового подхода к судостроению в целом.

На сегодняшний день на предприятиях судостроительной промышленности наблюдается общая для всех проблема. Точность изготовления деталей, секций и блоков является неудовлетворительной, что

приводит к необходимости проведения значительного объема пригоночных работ. Опыт постройки сварных судов показывает, что деформации узлов и секций, возникающие в процессе сварки, значительно осложняют сборку и сварку корпусов. Это ощутимо затягивает доставельный и стапельный периоды постройки судов, а также увеличивает стоимость производства корпуса судна (до 20 % конечной стоимости постройки корпуса может приходиться на пригоночные работы). Иногда деформации корпусных конструкций достигают такой величины, что выправить их становится невозможно и готовые конструкции бракуются [3].

Существующие аналитические методы определения сварочных деформаций в большинстве своем основываются на упрощающих задачу предполо-



жениях и допущениях [1]. В силу этого все аналитические методы являются весьма приближенными и позволяют рассчитывать с приемлемой точностью только простейшие сварные соединения. По этой причине такие методы не нашли практического применения на производстве [2].

Альтернативой аналитическим методам являются численные расчеты, базирующиеся на использовании мощных компьютеров и программных средств. В этой связи следует упомянуть существующие специализированные конечноэлементные комплексы SYSWELD и Simufact welding. Вместе с тем эти и подобные им программные средства характеризуются избыточным функционалом, высокой стоимостью и сложностью освоения пользователем. Кроме того, они не дают возможности быстро провести расчеты большого количества сварных соединений.

Первопроходцами в области постройки судов в чистый размер можно назвать южнокорейские судостроительные заводы. Однако используемая ими методика имеет одну важную особенность. В Южной Корее налажено производство судов и кораблей крупными сериями в десять и более судов одного проекта (часто даже более 20). Ввиду этого корейские судостроители могут, проводя мониторинг изготавливаемых деталей, внося правки в чертежи и раскройные карты, постепенно выходить на «чистый» размер. Обычно это происходит к четвертому или пятому судну в серии.

К сожалению, современные реалии и особенности судостроения в России не позволяют нам идти по тому же пути. Основная причина такого положения заключается в том, что большинство верфей, особенно крупных, задействованы в строительстве уникальных судов, выпускающихся либо в единичном экземпляре, либо малыми сериями от трех до пяти кораблей.

Некоторые российские верфи используют накопленные на собственном опыте статистические данные. Но данные, полученные таким путем, являются приближенными, т.к. при измерениях обычно применяется простое измерительное оборудование и не учитываются ошибки в геометрии деталей, полученные на этапах резки деталей и подготовки кромок к сварке. Такой подход не позволяет достичь необходимой точности и требуемого уровня технологичности процесса. Другими словами, это не дает возможности значительно снизить пригоночные работы и не может привести к ощутимому снижению затрат и стоимости производства судового корпуса.

Некоторые судостроительные предприятия и вовсе не имеют подобных статистических данных и выполняют резку без учета припусков, т.е. раскройные карты полностью повторяют чертежи.

Для решения обозначенной выше проблемы предлагается разработать методику постройки судов в чистый размер на основе данных, полученных в ходе натурных экспериментов, и расчетных значений, вычисленных путем моделирования процесса сварки в конечноэлементном комплексе ANSYS.

Можно выделить три основные и очевидные группы неточностей при сборке судового корпуса:

- 1) Субъективные неточности, причиной возникновения которых является ошибка проектировщика, технолога, оператора машины газоплазменной резки, оператора портальной сварочной машины или полуавтоматической сварки и т.д. Другими словами, в эту группу входят все ошибки, причиной которых является человеческий фактор.
- 2) Ошибки и несовмещения при раскрое листов металла и нанесении разметки для установки набора на полотнища. Возникновение подобных ошибок обусловлено зачастую низкой точностью машин газоплазменной резки из-за их плохой настройки и калибровки или значительным износом движущихся частей машин.
- 3) Сварочные деформации. Конечно, для всех является очевидным, что при сварке листов и полос малой толщины будут возникать значительные деформации. Однако, вопреки широко распространенному мнению, деформации наблюдаются и заметно влияют на общую геометрию секций и при сварке полотнищ толщиной более 20 мм.

## Научно-техническая база

Разработка методики постройки судов в чистый размер требует наличия специфического оборудования, а также высокой квалификации исполнителей, как в проведении измерений, так и в расчетной части методики.

Для контроля точности машин газоплазменной резки рекомендуется использовать высокоточные лазерные координатно-измерительные системы, оснащенные как лазерным дальномером, так и интерферометром. При измерениях, описанных в настоящей работе, использовался лазерный трекер API Radian (рис. 1). Объемная точность данной системы составляет  $\pm(10 + 5 \times L)$  мкм, где  $L$  – длина, м.

Для измерений точности изготовления готовых деталей (как плоских, так и имеющих произволь-



**Рис. 1.** Лазерные координатно-измерительные системы API Radian (а) и API Omnitrac2 (б)

ную кривизну), элементов набора, небольших сварных узлов и секций, а также контроля сварочных деформаций рекомендуется также использовать высокоточные лазерные координатно-измерительные системы, оснащенные абсолютным дальномером. Наличие интерферометра в системе не обязательно. При проведении описанных работ использовался лазерный трекер API Omnitrac2 (рис. 1). Объемная точность данной системы составляет  $\pm(10 + 5 \times L)$ , мкм, где  $L$  – длина, м.

Для контроля сборки секций и блоков на достаточном и стапельном периодах рекомендуется использовать лазерные координатно-измерительные системы типа лазерный трекер и тахеометр SOKKIA net05axii.

Обработка всех результатов измерений производится в программной среде Spatial Analyser. Для создания расчетных моделей с целью предсказания сварочных деформаций предполагается использовать конечноэлементный комплекс ANSYS.

### Контроль точности машин газоплазменной резки

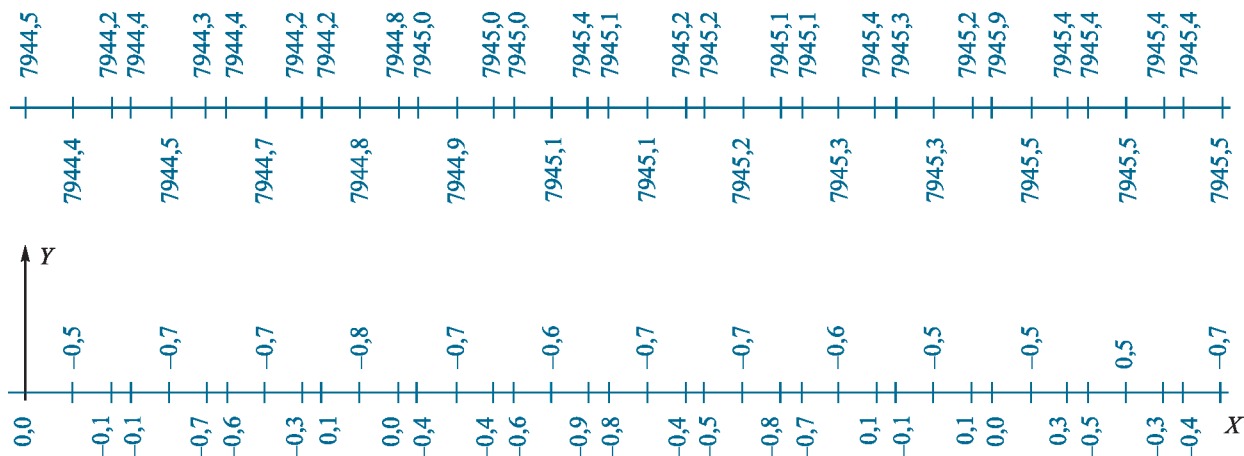
Первое, что необходимо сделать для обеспечения высокой точности постройки кораблей – удостовериться в том, что вырезаемые детали изготавливаются с достаточной точностью. Точность резательных машин определяется двумя факторами:

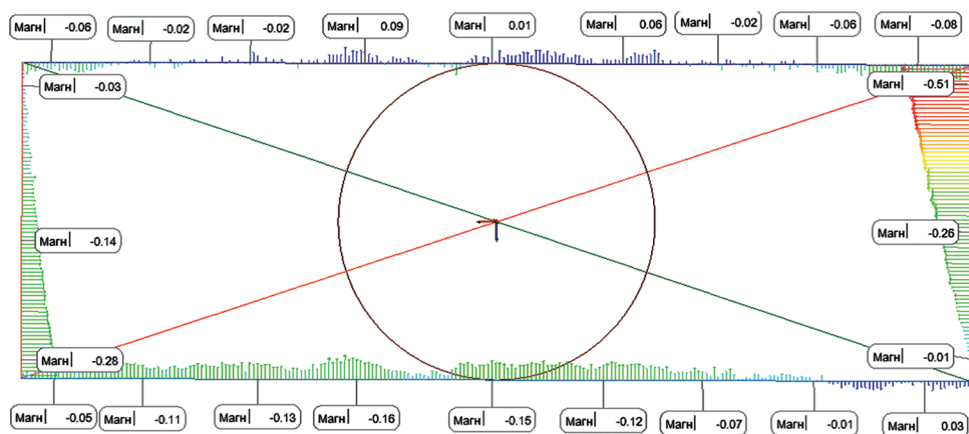
- 1) ровность рельс, по которым движется портал;
- 2) качество шаговых двигателей, обеспечивающих движение портала вдоль стола и режущей головки по portalу.

Для примера рассмотрим процесс и результаты проверки прямолинейности и параллельности направляющих рельс portalной машины газоплазменной резки Messer OmniMat8000.

Характерные точки выбирались с внутренней стороны рельса с использованием оснастки для измерения граней, позволяющей измерять одновременно боковую и верхнюю грани направляющего рельса (рис. 2). Трекер устанавливался на штативе на рабочий стол таким образом, что с одной стоянки были видны правый и левый рельс по каждому рабочему столу. Точки на рельсах выбирались приблизительно напротив прижимных креплений рельса к фундаменту.

**Рис. 2.** Отклонение измеренных точек от аппроксимирующих параллельных прямых (отклонения указаны в мм)





**Пояснение к отклонениям:**  
 Если значение «Магн» имеет отрицательный знак, значит полученная фигура в этой точке меньше номинала  
 Если значение «Магн» имеет положительный знак, значит полученная фигура в этой точке больше номинала

**Рис. 3.** Пример сравнения измеренных положений режущей головки с CAD-моделью (отклонения указаны в мм)

Для проверки точности позиционирования режущей головки непосредственно на подвижную часть устанавливался высокоточный сферический отражатель, после чего запускалась специально написанная тестовая программа. Режущая головка совершала обход рабочего стола по периметру, затем проводились диагонали по касательной к длинным сторонам прямоугольника, и точка их пересечения принималась в качестве центра окружности (рис. 3). Проверка заключалась в непосредственном сравнении значений наибольших отклонений положения головки от формы фигуры, описанной в управляющей программе.

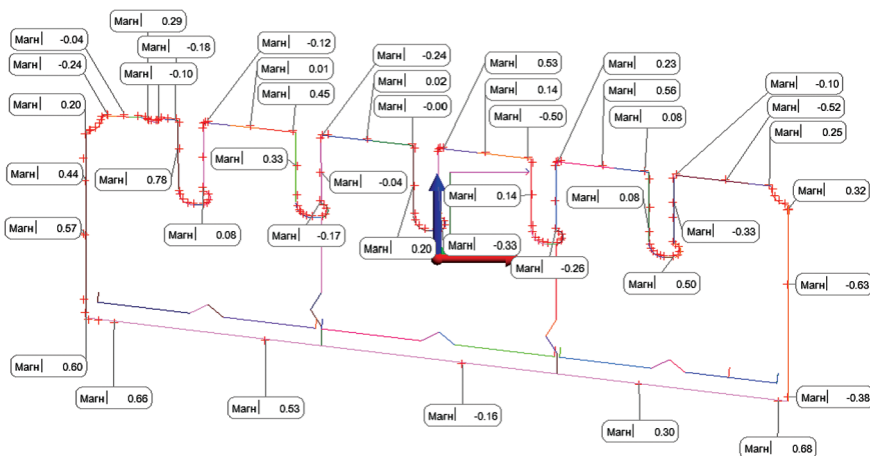
### Проверка точности вырезаемых деталей

Оптимальным подходом является выборочный контроль геометрии заготовок наиболее сложных

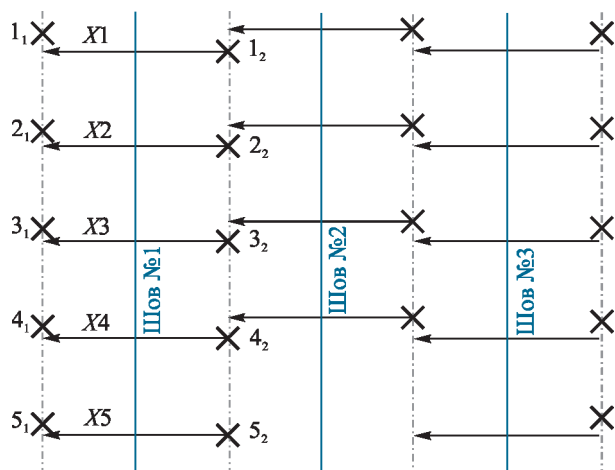
форм (рис. 4). Данный метод можно использовать как при измерении плоских деталей, так и для листов двойной кривизны. Перед проведением измерений необходимо убедиться в полном остывании детали. Также измерения проводятся с деталями, не подвергнутыми механической обработке, такой как разделка и зачистка кромок, шлифовка и полировка.

### Измерение величин сварочных деформаций при сварке полотнищ обшивки и настила

При проведении замеров использовалась мобильная координатно-измерительная система на базе лазерного трекера API Omnitrac2. Для обеспечения повторяемости положения призматического отражателя применялась специальная оснастка с кернителем.



**Рис. 4.** Пример результатов сравнения измеренной детали с CAD-моделью (расхождения указаны в мм)



**Рис. 5.** Схема расположения контрольных точек и проведения измерений

Для выполнения данных работ допускается использовать беспроводной щуп API vProbe. Однако ввиду того, что измеряемая поверхность является плоскостью, предпочтительней использовать подставку с магнитным основанием с кернителем. Это повышает стабильность получаемых результатов и минимизирует влияние на них человеческого фактора.

В ходе измерений на листы при помощи разметочного шнура наносятся линии, располагающиеся примерно на равном удалении от двух близлежащих швов. На каждой линии при помощи кернителя произвольным образом размечаются 5 точек. Желательно располагать их по всей протяженности линии на примерно равном расстоянии. Схема расположения точек приведена на рис. 5.

Для учета сварочных деформаций производится сравнение расстояний между характерными точками и аппроксимирующей линией, проведенной через левележащую группу характерных точек. Схема проведения измерений представлена на рис. 5.

По результатам замеров сварочных деформаций в полотнищах обшивки, проведенных на базе «Дальневосточного завода «Звезда» и «Судостроительного комплекса «Звезда», было обнаружено, что, несмотря на использование современного оборудования и сварки в соответствии с предварительными спецификациями процесса сварки пСПС № 121-BW-C21-01(RF), пСПС № 121-BW-C21-02(RF), пСПС № 121-BW-C21-03(RF) для марки стали D32W толщиной 20, 22 и 25 мм соответственно, величина усадки составляет в среднем 1,55 мм на каждом сварном шве.

## Расчет деформаций сварных конструкций методом конечных элементов

Помимо набора статистических данных, которые позволят предупреждать несовмещения в конструкциях, аналогичных измеренным, предполагается разработать систему типовых универсальных макросов для конечноэлементного комплекса ANSYS.

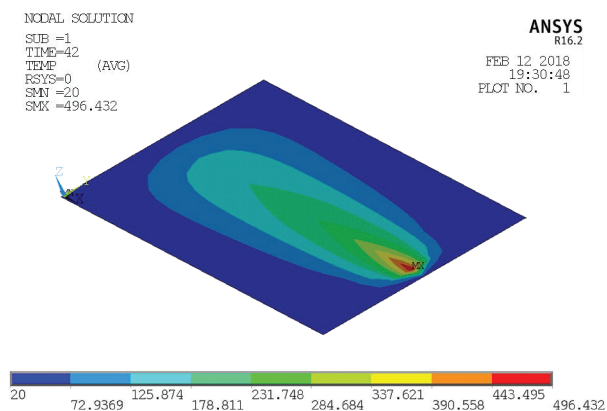
Учитывая ограниченность в вычислительных ресурсах и заведомую необходимость решения физически нелинейных задач с большим количеством конечных элементов (КЭ), следует пошагово усложнять и уточнять макросы до достижения необходимой точности. Приемлемой считается точность, когда либо расхождения между экспериментальными и расчетными данными не превышают 5 %, либо разницу в результатах можно компенсировать введением постоянного коэффициента или линейной функцией.

Макросы будут разделены по видам рассчитываемых конструкций:

- 1) сварные полотнища (рис. 6);
- 2) сварные тавры;
- 3) секции обшивки с набором (плоские участки);
- 4) секции обшивки с набором (участки с кривизной);
- 5) бортовые и днищевые секции сложных форм.

На данный момент ведется разработка макросов первой группы. Используются тепловые КЭ SHELL57, SOLID90, а также структурные SHELL41, SOLID95. Твердотельные элементы будут использоваться только в том случае, если не получится достичь необходимой точности при помощи оболочечных элементов.

**Рис. 6.** Пример результатов расчета теплового поля в полотнище из двух сваренных листов при использовании КЭ SHELL57



## Выводы и результаты

На данный момент достигнуты следующие результаты:

- 1) Разработана методика проверки точности машин газоплазменной резки.
- 2) В соответствии с данной методикой проведена проверка резательных машин на предприятиях ПАО «Судостроительный завод «Северная верфь» и АО «Дальневосточный завод «Звезда».
- 3) Разработана методика измерений сварочных деформаций полотнищ обшивки и настилов.
- 4) Начаты работы по выполнению выборочных измерений сварочных деформаций полотнищ.
- 5) Проводится текущий контроль точности изготовления бортовых и днищевых секций строящихся судов на предприятии ПАО «Судостроительный завод «Северная верфь».

Предстоящие работы и ожидаемые результаты:

- 1) Провести дополнительные измерения деформаций листов обшивки на толщинах менее 20 мм.
- 2) Провести серии измерений сварочных деформаций сварных тавров.
- 3) Разработать наборы макросов для расчета сварочных деформаций в среде конечноэлементного комплекса ANSYS.

## Библиографический список

1. РД 5Р.9807-93. Корпуса металлических судов. Методы определения и предотвращения остаточных сварных деформаций.

2. *Алферов В.И.* Методика расчета сварочных деформаций корпусных конструкций с применением МКЭ в статической постановке // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2009. Вып. 42. С. 93–116.
3. *Кузьминов С.А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1974.

## Сведения об авторах

*Белозёров Алексей Александрович*, директор ООО «Нева Технолоджи». Адрес: 198097, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Новооовсянниковская, 17, лит. А. Телефон: +7 (812) 337-51-92. E-mail: sls@sls.spb.ru.

*Бондарь Михаил Михайлович*, студент-магистрант СПбГМТУ. Адрес: 190008, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Телефон: +7 911 972-80-82. E-mail: bondar\_smk@mail.ru.

*Манухин Вадим Анатольевич*, к.т.н., доцент СПбГМТУ. Телефон: +7 (812) 494-09-42. E-mail: nikaL6@mail.ru.

Поступила / Received: 02.03.18  
Принята в печать / Accepted: 03.05.18  
© Коллектив авторов, 2018