ООО «Нева Технолоджи»
198097, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Новоовсянниковская, д.17, Лит. А
Тел./факс: +7 (812) 380-92-13
+7 (812) 784-15-34; 784-96-70
www.nevatec.ru
info@nevatech.ru

А.А. БЕЛОЗЁРОВ[2], М.М. БОНДАРЬ[1,2], В.А. МАНУХИН[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет
[2] ООО «Нева Технолоджи»
Санкт-Петербург, Россия

Подход к разработке базового ядра методики постройки судового корпуса в чистый размер.

Объект и цель научной работы. Разработка принципиального подхода к написанию методики постройки судового корпуса в чистый размер на основе объединения данных полученных экспериментальным путём и расчётом методом конечных элементов.

Материалы и методы. Расчётные данные получаются путём моделирования процесса сварки в среде конечно-элементного комплекса ANSYS. Экспериментальные данные получаются путём проведения измерений на базе судостроительных предприятий на фактически строящихся заказах.

Основные результаты. Разработаны методики оценки точности работы машин газоплазменной резки, замеров деталей и сварных секций произвольных форм и сложности. Начаты работы по проведению замеров на предприятиях судостроительной промышленности.

Заключение. Существующие на данный момент методы определения сварочных деформаций, а так же применяемые технологические решения не позволяют обеспечить достаточную точность при постройке судовых корпусов. Описанные методы уже частично внедряются на производствах и приводят к увеличению точности изготовления секций и блоков.

Ключевые слова. Судометрика, метрология, сварочные деформации, метод конечных элементов, чистый размер.

Введение

Судостроительная промышленность в России на данный момент переживает очевидный и закономерный подъём. В первую очередь это касается создания надводных и подводных кораблей, ледоколов и прочих специализированных судов. Повсеместно на верфях закупается новое оборудование, вводятся в эксплуатацию новые линии и даже открываются новые крупные верфи, например, 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 объёма 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 достапельный 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 на сегодняшний день аналитические методы определения сварочных деформаций базируются в большинстве своём на упрощающих задачу предположениях и допущениях [1]. В силу этого все аналитические методы являются очень 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, базирующие на использовании мощных компьютеров и программных средств.

В этой связи следует упомянуть существующие специализированные конечно-элементные 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 расчёты 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 10 и более судов одного проект (часто даже более 20). Ввиду этого, корейские судостроители имеют возможность, проводя мониторинг изготавливаемых деталей, внося правки в чертежи и раскройные карты, постепенно выходить на «чистый» размер. Обычно это происходит к четвёртому или пятому суду 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 трёх до пяти кораблей.

Некоторые российские верфи используют накопленные на собственном опыте статистические данные. Но данные, полученные таким путём, являются приближёнными, т.к. при измерениях обычно используется 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 даёт возможности значительно снизить пригоночные работы и не может привести к ощутимому снижению трудозатрат и стоимости производства судового корпуса.

Некоторые судостроительные предприятия и вовсе не имеют подобных статистических данных и выполняют резку без учёта 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 расчётных значений, вычисленных путём моделирования процесса сварки в конечно-элементном комплексе ANSYS.

NEVA TECHNOLOGY

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 наблюдаться значительные деформации. Однако, вопреки широко распространённому 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 части проведения измерений, так и касательно расчётной части методики.

Для контроля точности машин газоплазменной резки рекомендуется использовать высокоточные измерительные лазерные координатно-измерительные системы, оснащённые как лазерным дальномером, так и интерферометром. При измерениях, описанных в данной работе, использовался лазерный трекер API Radian (рис.1). Объёмная точность данной системы составляет ±(10+5*L), мкм. Где L – длина, м.

Для проведения измерений точности изготовления готовых деталей (как плоских, так и имеющих произвольную кривизну), элементов набора, небольших сварных узлов и секций, а также контроля сварочных деформаций рекомендуется использовать высокоточные измерительные лазерные координатно-измерительные системы, оснащённые абсолютным дальномером. Наличие интерферометра в системе не обязательно. При проведении работ, описанных в данной статье, использовался лазерный трекер API Omnitrac2 (рис.1). Объёмная точность данной системы составляет ±(10+5*L), мкм. Где L – длина, м.

Для контроля сборки секций и блоков на достапельном 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 расчётных моделей для предсказания сварочных деформаций предполагается использовать конечно-элементный комплекс ANSYS.

Рисунок 1. Лазерные координатно-измерительные системы API Radian (слева) и API Omnitrac2 (справа)

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) Ровностью рельс, по которым движется портал

2) Качеством шаговых двигателей, обеспечивающих движение портала вдоль стола и режущей головки по порталу.

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

Характерные точки выбирались с внутренней стороны рельса с использованием оснастки для измерения граней, позволяющей измерять одновременно боковую и верхнюю грань направляющего рельса (рис2). 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.

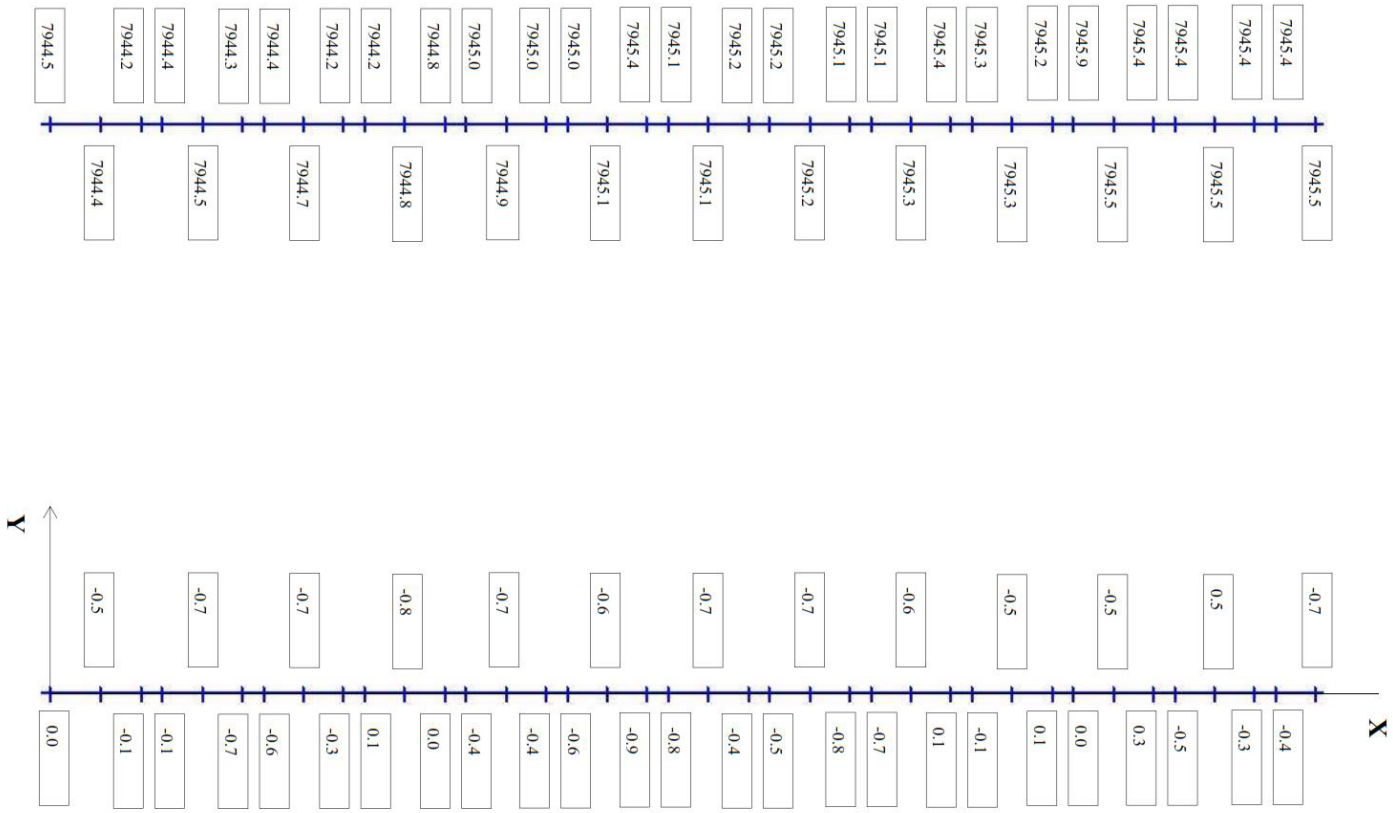

Рисунок 2. Отклонение измеренных точек от аппроксимирующих параллельных прямых (отклонения указаны в мм)

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, точка пересечения которых принималась центром окружности, касательной к длинным сторонам прямоугольника (рис.3). Проверка заключалась в непосредственном сравнении значений наибольших отклонений положения головки от формы фигуры, описанной в управляющей программе.

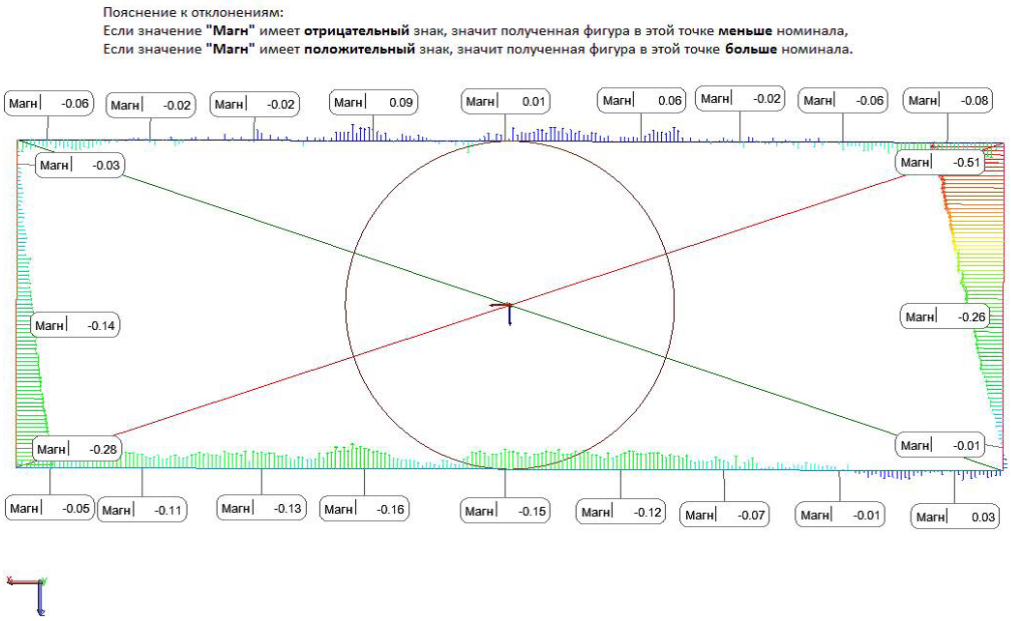

Рисунок 3. Пример сравнения измеренных положений режущей головки с CAD моделью. Отклонения указаны в мм.

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 для листов двоякой кривизны. Перед проведением измерений необходимо убедиться в полном остывании детали. Так же, измерения проводятся с деталями, не подвергнутыми механической обработке, такой как разделка и зачистка кромок, шлифовка и полировка.

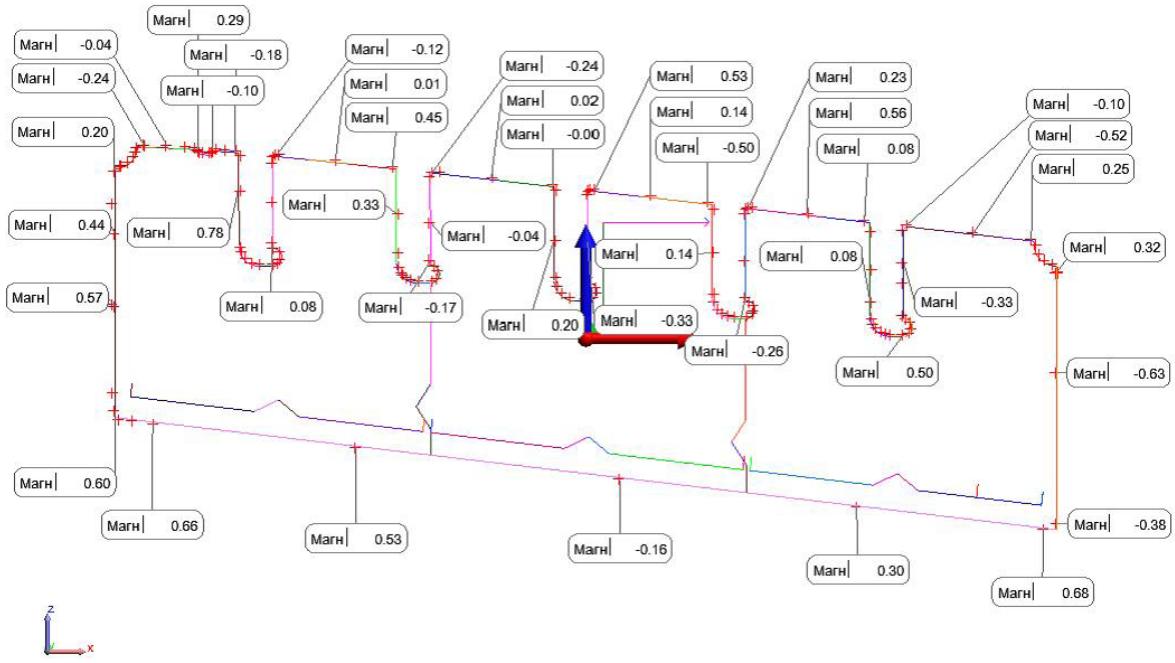

Рисунок 4. Пример результатов сравнения измеренной детали с CAD моделью, расхождения указаны в мм.

Измерение величин сварочных деформаций при сварке полотнищ обшивки и настила

Для проведения замеров использовалась мобильная координатно-измерительная система на базе лазерного трекера API OMNITRAC2. Для обеспечения повторяемости положения призматического отражателя использовалась специальная оснастка с кернителем.

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

Для проведения 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 указана на рис.5.

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

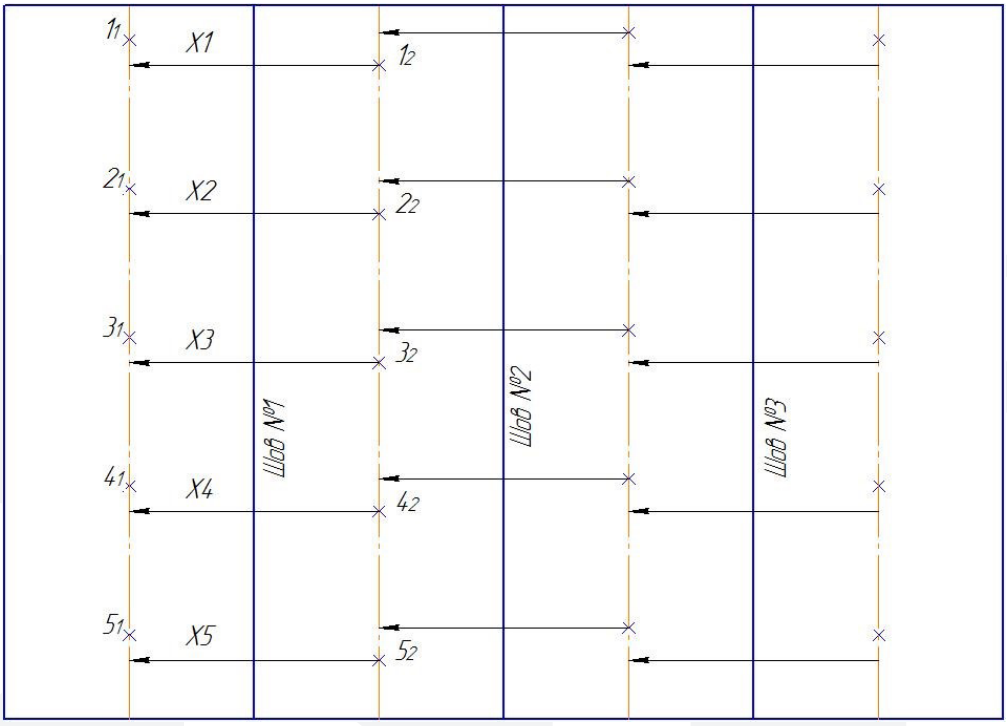

Рисунок 5. Схема расположения контрольных точек и проведения измерений

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 оборудование и сварки в соответствии с 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.

Расчёт 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 конечно-элементного комплекса ANSYS.

Учитывая ограниченность в вычислительных ресурсах и заведомую необходимость решения физически нелинейных задач с большим количеством конечных элементов (КЭ), макросы будут пошагово усложняться и уточняться до достижения необходимой точности. Приемлемой точностью будет считаться ситуация, когда расхождения между экспериментальными и расчётными данными не превышают 5% или разница в результатах может быть компенсирована 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 так же структурные SHELL41, SOLID95. Твердотельные элементы будут использоваться только в том случае, если не получится достичь необходимой точности при помощи оболочечных элементов.

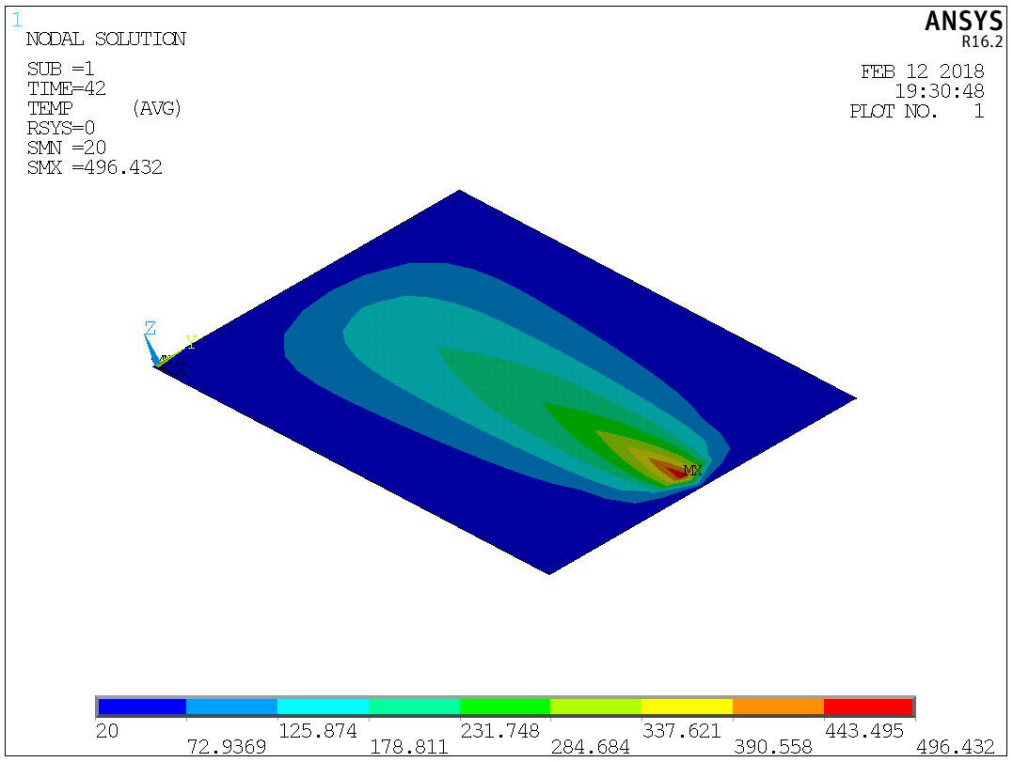

Рисунок 6. Пример результатов расчёта теплового поля в полотнище из двух листов, SHELL57.

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 настила.

4) Начаты работы по проведению 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 расчёта сварочных деформаций в среде конечно-элементного комплекса ANSYS.

Библиографический список

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

2. Алфёров В.И. Методика Расчёта сварочных деформаций корпусных конструкций с применением МКЭ в статической постановке / В.И. Алфёров // Труды крыловского государственного научного центра. -2009 г. -№42. –С. 93-116.

3. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1974.

NEVA TECHNOLOGY