

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт металлургии, машиностроения и транспорта
Кафедра «Теория и технология сварки и материалов»

Работа допущена к защите
Заведующий кафедрой
_____ С.Г. Паршин
«__» _____ 2019 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ КОРПУСА ПАРУСНОЙ ЯХТЫ

по направлению 22.04.02 Металлургия
по образовательной программе 22.04.02_03 Теоретические основы процессов
сварки

Выполнил студент группы 23346/6
Руководитель, к.т.н., доцент

Б.А. Белов
И.В. Иванова

Санкт-Петербург
2019

РЕФЕРАТ

На 94 страницах, 51 рисунок, 15 таблиц

МАЛОМЕРНОЕ СУДОСТРОЕНИЕ, ЯХТОСТРОЕНИЕ, СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, НИЗКОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ, СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ СУДНА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, ЧАСТИЧНО МЕХАНИЗИРОВАННАЯ СВАРКА, РЕЖИМЫ СВАРКИ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ХОДОВЫЕ КАЧЕСТВА СУДНА, СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, НАБОР СУДНА, ОБШИВКА СУДНА

В магистерской работе разработана конструкция корпуса стальной парусной яхты с применением концепции конструктивно-технологического проектирования.

Проведён анализ типовых проектов стальных парусных яхт, на основании которого разработано техническое задание проекта. Выбран основной материал конструкции, проведена комплексная оценка его качества. Сконструирован набор и обшивка корпуса, рассчитаны параметры сварных соединений. Проведён расчет основных мореходных качеств спроектированного судна. Рассчитаны режимы сварки и ожидаемые механические характеристики сварных соединений. Проведено моделирование процессов сварки корпуса яхты, установлены расчетные деформации и выбран оптимальный порядок наложения сварных швов. Разработан технологический процесс сборки и сварки корпуса яхты.

Работа может быть полезна при проектировании стальных маломерных судов, а также при разработке и оптимизации технологии их изготовления.

THE ABSTRACT

94 pages, 51 figures, 15 tables

SMALL SHIPBUILDING, YACHT BUILDING, WELDED CONSTRUCTIONS, STRUCTURAL TECHNOLOGICAL DESIGN, LOW-ALLOYED STEEL, WELDING PROCESSES, MODELING, STRENGTH OF SHIP, TECHNOLOGICAL PROCESS, MAG, WELDING MODES, QUALITY CONTROL, SEAWORTHINESS OF THE SHIP, WELDING EQUIPMENT, WELDING MATERIALS, WELDING JOINT, SET OF VESSEL, HULL LINING

In the master's work, the design of the hull of a steel sailing yacht was developed using the concept of structural and technological design.

The analysis of typical projects of steel sailing yachts was carried out, on the basis of which the technical task of the project was developed. The main material of construction has been chosen, a comprehensive assessment of its quality has been carried out. The set and hull lining are designed, the parameters of welded joints are calculated. The calculation of the main nautical qualities of the project vessel. Calculated welding modes and the expected mechanical characteristics of welded joints. A simulation of the welding process of the hull of the yacht has been carried out, the calculated deformations have been established, and the optimal procedure for applying welds has been selected. The technological process of assembling and welding the hull of the yacht.

The work can be useful in the design of small steel vessels, as well as in the development and optimization of their production technology.

Содержание

Введение	5
Глава 1. Описание конструкции судна.....	9
1.1. Анализ типовых проектов стальных парусных яхт. Применение стали в яхтостроении	10
1.2. Техническое задание. Назначение судна и основные требования.....	16
1.3. Эскизная проработка проекта.....	17
Глава 2. Разработка проекта судна.....	18
2.1. Создание теоретического чертежа корпуса судна	18
2.2. Выбор материала конструкции. Комплексная оценка качества стали	20
2.3. Конструирование набора судна	25
2.4. Конструирование обшивки корпуса судна	30
2.5. Выбор параметров сварных соединений.....	38
2.6. Расчет ходовых качеств проектируемого судна	42
Глава 3. Разработка технологического процесса сборки и сварки корпуса судна	44
3.1. Выбор способа сварки и расчет режимов	44
3.2. Выбор сварочных материалов и расчет ожидаемых механических характеристик сварных соединений.....	51
3.3. Выбор сварочного и вспомогательного оборудования	55
3.4. Моделирование процессов сварки корпуса судна	59
3.5. Назначение методов и объёма контроля качества сварных соединений	69
3.6. Технологический процесс сборки и сварки корпуса судна	72
Выводы	85
Заключение	88
Список литературы	89

Введение

Возрастающий интерес к парусному спорту и водному туризму заставляет серьезнее задуматься над проблемами проектирования и строительства новых маломерных парусных судов, а также совершенствования уже известных проектов. Эта необходимость объясняется:

1. Отдельными недостатками серийных проектов парусных яхт. Примеры: глубокая осадка, недостаточные ходовые характеристики, малая эргономичность, малый диапазон условий эксплуатации (например, только внутренние водные пути).
2. Изменением требований организаций по регистрации и сертификации маломерных судов.
3. Развитием технологий в области судостроения, материаловедения, сварки и др.

При создании нового проекта маломерного судна конструктор сталкивается со следующими проблемами:

1. Экономическая целесообразность проекта
2. Безопасность судна
3. Ходовые характеристики судна
4. Эргономичность
5. Срок службы судна
6. Эксплуатационные затраты

Эти вопросы могут быть успешно решены только с применением концепции конструктивно-технологического проектирования яхты с использованием современных CAD/CAM/CAE систем [1,2]. Кроме того, применение данной концепции позволяет значительно снизить временные и финансовые затраты на проектирование судна. При этом конструктору необходимо правильно выбрать основной материал судна, рационально спроектировать конструкцию корпуса яхты, а также технологический процесс изготовления.

Кроме вышеперечисленных проблем, при сборке и сварке стальных маломерных судов могут возникать значительные сварочные деформации и

напряжения. Поэтому вопрос об их уменьшении стоит ещё на начальных этапах проектирования стального судна. Использование программного обеспечения для моделирования процессов сварки позволяет установить распределение и величину деформаций и напряжений в конструкции корпуса и выбрать наиболее оптимальные режимы сварки и последовательность выполнения сварных швов.

Цель работы: Разработать и оптимизировать проект конструкции корпуса парусной яхты, а также технологический процесс его сборки и сварки.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач:

1. Провести анализ проектов стальных парусных яхт и применения стали как основного материала при строительстве маломерных парусных судов.
2. Разработать техническое задание, сформулировать основные требования к судну. Создать эскизы проекта.
3. Создать теоретический чертеж корпуса яхты.
4. Выбрать материал конструкции и провести его комплексную оценку.
5. Сконструировать набор судна. Выбрать систему набора, размер шпации, количество шпангоутов и скул. Создать 3D-модель набора судна.
6. Сконструировать обшивку корпуса судна. Создать 3D-модель обшивки, а также развёртки листов обшивки на плоскость и их раскрой.
7. Выполнить прочностной расчет разработанной конструкции корпуса.
8. Произвести расчет основных гидростатических и гидродинамических характеристик проекта маломерного парусного судна.
9. Выбрать основные параметры сварных соединений конструкции судна.
10. Выбрать способ сварки и рассчитать режимы.

11. Выбрать сварочные материалы и произвести расчет ожидаемых механических характеристик сварных соединений.
12. Выбрать сварочное и вспомогательное оборудование.
13. Провести моделирование процессов сварки и выбрать оптимальный порядок выполнения сварных швов.
14. Назначить объем и методы контроля качества сварных соединений.
15. Разработать технологический процесс сборки и сварки корпуса судна.

Данные задачи выполняются с применением следующих систем автоматизированного проектирования (САПР):

1. КОМПАС-3D (машиностроительная конфигурация):
 - Библиотека Сварные соединения
 - Библиотека APM-FEM: прочностной анализ
2. Free!Ship.
3. ESI SYSWELD:
 - Visual-Mesh
 - Visual-Viewer
 - Visual-Weld
 - Weld Planner

Научная новизна работы:

1. В работе выполнено математическое моделирование процесса сварки сложной, криволинейной конструкции корпуса маломерного судна с помощью программного обеспечения ESI SYSWELD, которое позволило с высокой степенью достоверности создать модель сварочных деформаций и напряжений, а также установить их распределение в сварном соединении в зависимости от режима сварки и порядка наложения валиков.
2. На основе математического моделирования обнаружена и экспериментально подтверждена возможность управления развитием сварочных деформаций и напряжений в сложных конструкциях маломерных су-

дов за счёт применения рациональной технологии сборки и сварки, а также путём оптимизации способа и порядка выполнения сварных швов.

3. Кроме того, в результате моделирования процесса сварки корпуса яхты, установлено, что не может быть универсальных однозначных рекомендаций по предотвращению сварочных деформаций и напряжений. В каждом конкретном случае следует критически анализировать возможность применения различных методов их уменьшения и применять оптимальный для конкретной конструкции.

Практическая ценность результатов:

1. На основании анализа конструкций типовых проектов стальных парусных яхт, составлено техническое задание и разработан теоретический чертеж нового проекта яхты.
2. Сконструированы набор и обшивка корпуса парусной яхты, проведён прочностной анализ конструкции, который показал её высокую общую прочность при эксплуатации в тяжелых морских условиях. Кроме того, расчетным методом установлены высокие мореходные характеристики проектируемого судна, соответствующие требованиям поднадзорных органов.
3. Представлен оптимальный алгоритм разработки и оптимизации стального корпуса парусной яхты с применением концепции конструктивно-технологического проектирования конструкций.
4. На основе расчетно-экспериментальных данных выбраны режимы сварки разработанного корпуса яхты, а также оптимальное сварочное оборудование и материалы, обеспечивающие высокое качество сварных соединений.
5. Разработаны стапель и кильблок для сборки и сварки корпуса парусной яхты.
6. Расчетно-экспериментальным методом выбран оптимальный способ и порядок выполнения сварных швов корпуса яхты, обеспечивающий

минимальные деформации конструкции.

7. На основании разработанного проекта и технологического процесса сборки и сварки была изготовлена парусная яхта «Ласточка». Проведенные ходовые испытания яхты показали, что судно безопасно для эксплуатации, полностью соответствует заданным техническим характеристикам, а также обладает высокими мореходными качествами по сравнению с другими яхтами своего класса.

Апробация работы: Основные и отдельные положения работы представлялись и выносились на обсуждение на Конкурсе студенческих научных работ в рамках Недели Науки СПбПУ по направлению «Сварка и родственные технологии» (ноябрь 2017 г., ноябрь 2018 г.), на международной молодежной научной конференции «Юность и знания - гарантия успеха - 2017» (Курск, 2017 г.).

По материалам работы опубликовано 4 статьи в научных журналах и сборниках РИНЦ:

1. Белов Б.А., Иванова И.В. Разработка технологии изготовления сварного корпуса парусной яхты // Материалы МНТК «Неделя Науки». ИММИТ. СПб: Изд-во СПбПУ, 2018. С. 82–85.
2. Белов Б.А., Иванова И.В. Разработка технологии изготовления килевой системы парусно-моторной яхты // Материалы МНТК «Неделя Науки». ИММИТ. – СПб: Изд-во СПбПУ, 2017. – С. 199–202.
3. Белов Б.А., Иванова И.В. Проектирование килевой системы парусно-моторной яхты // Материалы МНТК «Неделя Науки». ИММИТ. – СПб: Изд-во СПбПУ, 2017. – С. 196–199.
4. Белов Б.А., Иванова И.В., Калинина В.И. Опыт изготовления килевой системы парусно-моторной яхты // Юность и знания – гарантия успеха - 2017: Материалы МНТК. Курск: ЮЗГУ, 2017. С. 111–113.

Глава 1. Описание конструкции судна

1.1. Анализ типовых проектов стальных парусных яхт. Применение стали в яхтостроении

В зависимости от назначения парусные яхты можно разделить на гоночные, крейсерские (прогулочно-туристские) и крейсерско-гоночные.

По способу противодействия крену и дрейфу при ходе под парусами различают три основных типа яхт [3]:

1. килевые яхты, у которых восстанавливающий момент создаёт главным образом балласт, а противодействие дрейфу - развитый киль-плавник;
2. швертботы, у которых противодействие крену обеспечивается за счет остойчивости формы, а поперечная сила – подъемным швертом;
3. компромиссы, которые совмещают малую осадку швертбота и высокую остойчивость килевой яхты, применяя короткий балластный киль и массивный шверт;
4. многокорпусные суда.

В качестве материалов для большинства современных крейсерских и крейсерско-гоночных яхт используются полимеры, алюминиевые сплавы и дерево. Однако в последние годы расширяется применение низколегированной и низкоуглеродистой стали, так как она обладает рядом преимуществ по сравнению с другими материалами:

- низкая стоимость;
- высокая прочность и пластичность;
- несложный ремонт и простота эксплуатации судов из стали.

Однако существуют и недостатки, ограничивающие применение сталей в яхтостроении:

- Высокая плотность материала, из-за чего масса стального судна длиной до 8 метров будет существенно выше массы судна из другого материала. Поэтому применение стали является рациональным только при строительстве крейсерских и крейсерско-гоночных яхт длиной от 9-10 метров.
- Подверженность коррозии, поэтому при задании толщины обшивки

стального корпуса учитывается запас за коррозионный износ. Однако на скорость коррозии значительно влияют условия эксплуатации, защитное покрытие металла и его обслуживание.

- Придание корпусу яхты сложных и плавных обводов, обеспечивающих высокие ходовые характеристики, связано со значительными финансовыми затратами. Поэтому применение стали при строительстве яхт с такими обводами является экономически оправданным только при серийной постройке.

Рассмотрим некоторые проекты парусных яхт из низкоуглеродистой стали и выделим особенности их проектирования [3, 4, 5, 6]:

1. Проект яхты «Гидра» (Рис. 1), К. Рейнке.

Килевая крейсерско-гоночная парусно-моторная яхта с двухскуловыми обводами и длинной ватерлинией, обладающая высокими ходовыми характеристиками. Такие характеристики обеспечиваются благодаря применению трапецеидальных шпангоутов¹, малым углом подъема батоксов² и острыми скулами, ориентированными вдоль потока воды. Проект яхты создан в соответствии с требованиями Германского Ллойда и прошел множество успешных буксировочных испытаний в различных условиях, зарекомендовав себя во многих странах мира. Корпус яхты из низкоуглеродистой стали имеет простую и надёжную конструкцию, позволяющую значительно снизить себестоимость яхты, не навредив безопасности и мореходности. Однако яхта имеет глубокую осадку и не предназначена для плавания в прибрежных и внутренних водах. Кроме того, яхта обладает большим водоизмещением и требует значительных затрат на обслуживание.

¹ Поперечные ребра жесткости судна.

² Кривые, получаемые от пересечения поверхности судна плоскостями, параллельными диаметральной плоскости.

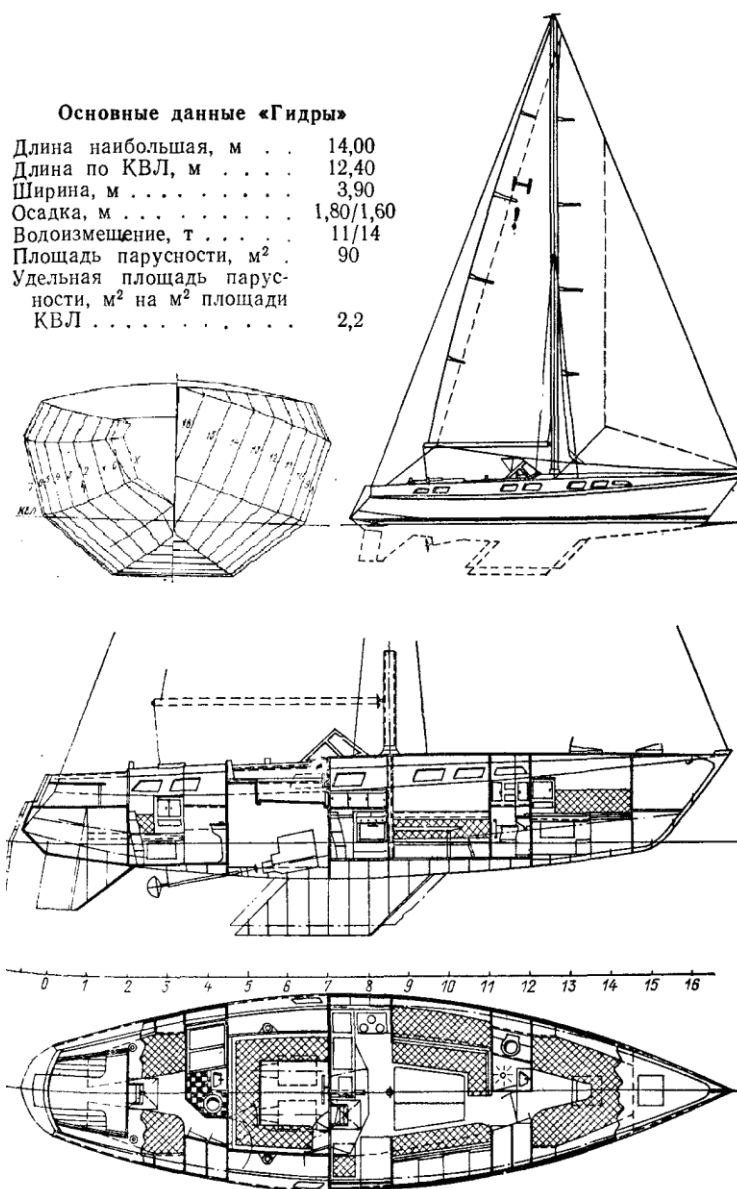


Рис.1. Проект парусно-моторной яхты «Гидра»

2. Проект яхты «Завод ЭТАЛОН» (Рис.2.), ОАО Казанский опытный завод «ЭТАЛОН».

Крейсерский швертбот для эксплуатации в условиях мелководья (внутренние воды, прибрежные морские воды) с малой автономностью плавания. Для увеличения остойчивости толщина обшивки на днище составляет до 25мм, а толщина борта 3мм. Конструкция имеет большой запас на коррозионный износ. Обводы корпуса, а также большое водоизмещение не позволяют добиться высоких ходовых характеристик. Яхта не предназначена для плавания в сложных погодных условиях. Однако простота изготовления, низкие себестоимость и эксплуа-

тационные затраты делают проекты подобного типа привлекательными для постройки малыми предприятиями и любителями.

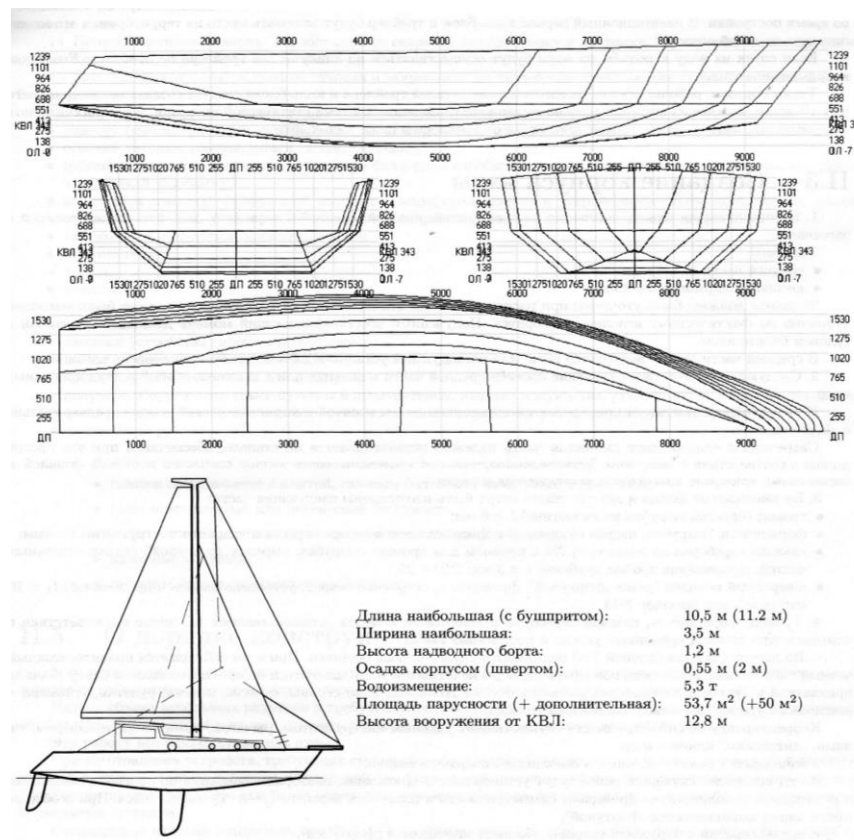


Рис. 2. Проект яхты «Завод ЭТАЛОН»

3. Проект Hout Bay 30 (Рис.3), Дадли Диксон.

Килевая крейсерская парусно-моторная яхта с неограниченным районом плавания. Плавные обводы яхты с радиусной скулой позволяют добиться высоких ходовых характеристик. Корпус имеет продольную систему набора (только стрингера) и толщину обшивки 3мм. В качестве поперечных связей (шпангоутов) выступают переборки из фанеры. Главными недостатками яхты является большое водоизмещение – 12 тонн и глубокая осадка – 1,7 метра. Кроме того, строительство яхты с радиусной скулой (Рис. 4) требует сложного технологического процесса с большим количеством сварных швов, значительно увеличивающего себестоимость яхты.

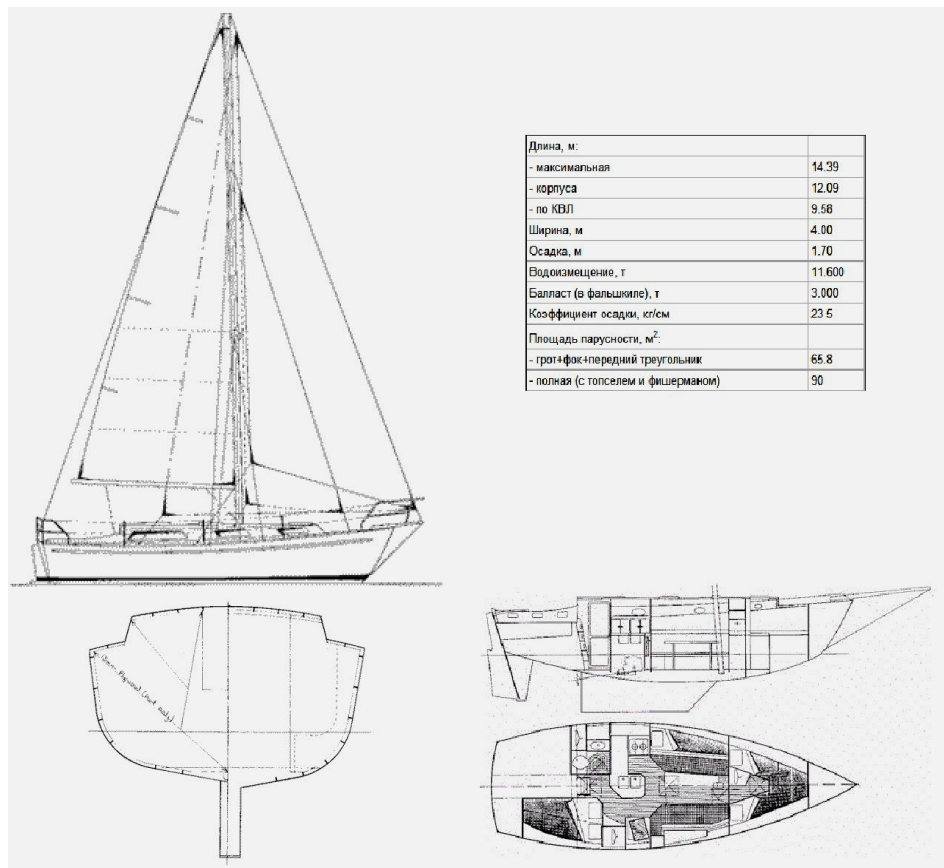


Рис.3. Проект яхты Hout Bay 30



Рис. 4. Строительство яхты Hout Bay 30

Анализ проектов яхт позволил выделить некоторые особенности проектирования и строительства парусных яхт из стали [3, 5, 7]:

1. Перед началом создания нового проекта яхты необходимо определить район плавания и условия эксплуатации.

2. Корпус яхты состоит из отдельных элементов: шпангоутов, стрингеров¹, форштевня², ахтерштевня³, киля и обшивки. Шпангоуты собираются в рамы. При сборке и сварке корпуса могут использоваться монтажные ребра жесткости.
3. При проектировании корпуса яхты необходимо стремиться к упрощению его конструкции и технологического процесса изготовления.
4. Толщина обшивки корпуса назначается с учетом местной прочности и коррозионного износа. Например, для яхт длиной до 10 метров толщина обшивки должна составлять не менее 2мм.
5. Увеличение толщины обшивки корпуса от борта к днищу позволяет повысить остойчивость яхты и добиться лучших ходовых характеристик судна.
6. Во время сварки корпуса стальной яхты неизбежно возникают деформации и напряжения, уменьшить которые можно путем выбора правильной последовательности выполнения сварных швов и режима сварки.
7. Допускается исправление деформаций термическим, термо-механическим и механическим способами.
8. При проектировании стальной яхты необходимо обеспечить свободный доступ к сварным соединениям.
9. Все сварные швы, находящиеся в контакте с водой, должны быть полностью герметичны, дефектов (кратеров, непроваров, подрезов) не допускается.
10. Готовый корпус необходимо подвергнуть пескоструйной или дробеструйной обработке и пассивированию, а также установить анодную электрохимическую защиту.

¹ Продольные элементы конструкции корпуса судна.

² Элемент носового заострения судна, на котором замыкается обшивка корпуса.

³ Кормовая часть судна, служащая опорой для руля или гребного вала.

1.2. Техническое задание. Назначение судна и основные требования

Основываясь на проведенном анализе, создается техническое задание (Таблица 1) нового проекта парусной яхты. От точности составления технического задания и количества указанных в нем параметров будет зависеть качество итогового проекта и время его создания.

Таблица 1. Техническое задание проекта парусной яхты

Параметр	Значение
Тип судна	Парусная яхта
Назначение судна	Крейсерско-гоночное
Район плавания	Неограниченный
Тип парусного вооружения	Бермудский шлюп ¹
Осадка	До 2 метров
Противодействие крену и дрейфу	Фальшкиль и шверт (компромисс)
Водоизмещение	До 5 тонн
Площадь парусности	От 40 м ²
Длина (общая)	До 10 метров
Ширина	До 3 метров
Высота борта	До 1,5 метров
Пассажировместимость	6 человек
Масса балласта	1,25 тонны
Основной материал	Низколегированная сталь

Согласно классификации Государственной инспекции по маломерным судам Российской Федерации (далее ГИМС) [8] яхта должна соответствовать первому классу.

Кроме вышеприведенных параметров яхта должна обладать простой конструкцией и несложной технологией изготовления, сопоставимой с возможностями малых предприятий.

¹ Одна мачта с двумя треугольными парусами: гротом и стакселем

1.3. Эскизная проработка проекта

Исходя из технического задания, проводится эскизная проработка проекта яхты (Рис. 5), позволяющая выявить его особенности, а также проблемы, связанные с конструированием и технологией изготовления яхты.

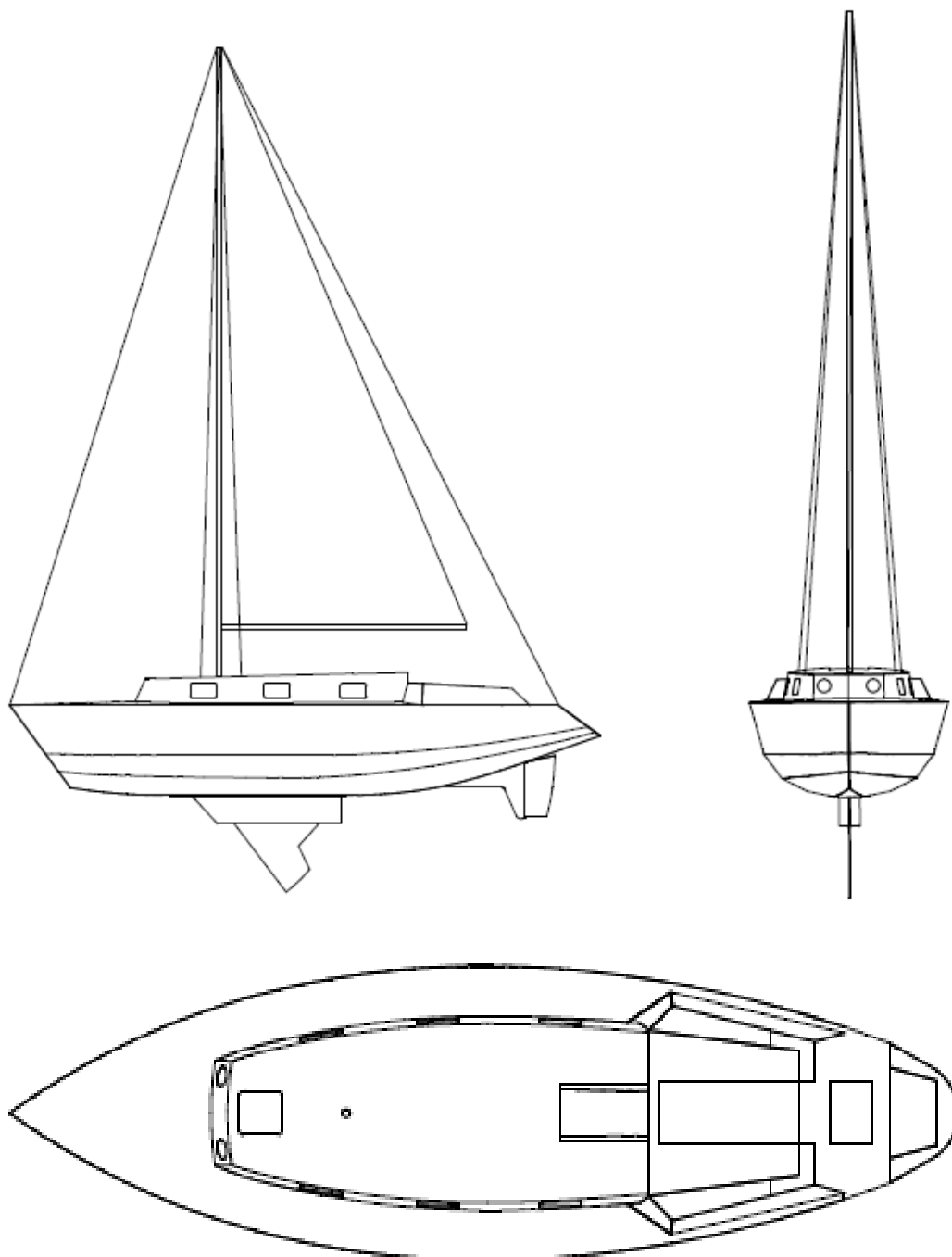


Рис. 5. Эскизы проекта

Глава 2. Разработка проекта судна

2.1. Создание теоретического чертежа корпуса судна

Теоретический чертеж создается на основании эскизов и технического задания судна. Он необходим для дальнейших расчетов ходовых характеристик парусного судна, остойчивости, маневренности и др. Опираясь на теоретический чертеж судна конструируется его набор. Также чертеж позволяет установить обводы шпангоутов, носа, кормы и уточнить многие другие параметры проекта. В системе автоматизированного проектирования Free!Ship создана 3D модель корпуса яхты (Рис. 6), а также теоретический чертеж (Рис. 7) В соответствии с рекомендациями специализированной литературы [3, 5] выбраны следующие параметры:

- трапециевидальная форма шпангоутов, обеспечивающая минимальную смоченную поверхность при достаточно высокой остойчивости;
- выбранная форма шпангоутов разделена на четыре острых скулы, которые пересекают ватерлинию под малым углом, что позволяет сохранить высокие ходовые характеристики и при этом заметно упростить сборку и сварку всей конструкции;
- угол схода батоксов на кормовой оконечности составляет 17° , что в сочетании с трапециевидальными шпангоутами позволяет уменьшить смоченную поверхность, улучшить обтекаемость и получить высокие ходовые характеристики;
- глубокий вход форштевня с острыми обводами обеспечивает лучшее поведение на волне, что особенно важно на яхте с достаточно большим водоизмещением.

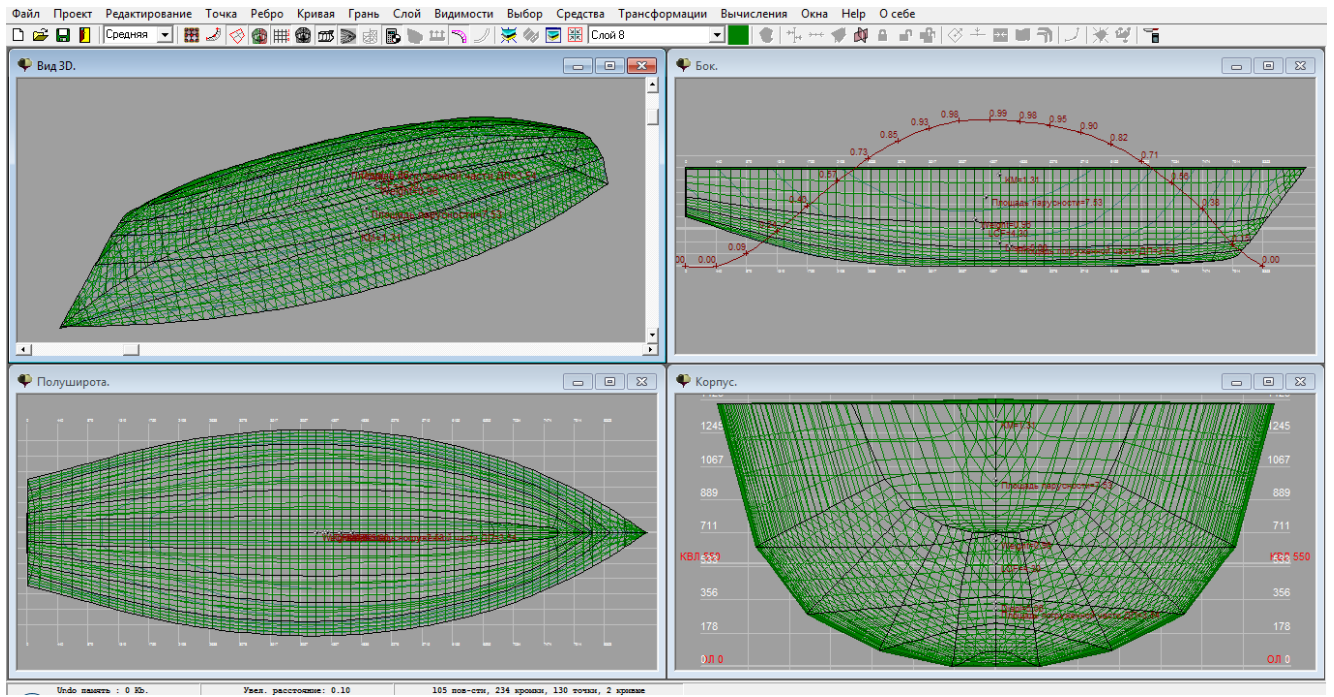


Рис. 6. Интерфейс САПР Free!Ship и 3D модель корпуса яхты

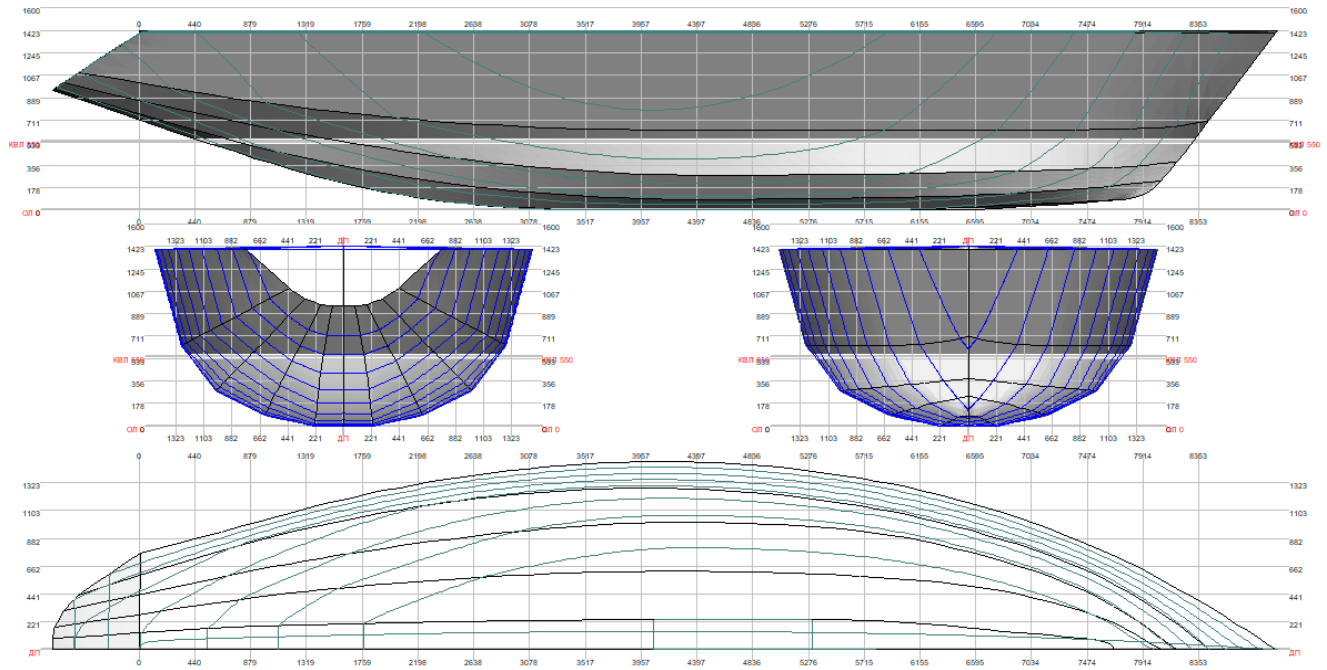


Рис. 7. Теоретический чертёж корпуса парусной яхты

2.2. Выбор материала конструкции. Комплексная оценка качества стали

Наиболее рациональным материалом для строительства крейсерско-гоночных яхт длиной от 9 метров является низкоуглеродистая и низколегированная сталь [3]. Стали этих классов обеспечивают низкую себестоимость конструкции, её надёжность, прочность и длительную эксплуатацию. Корпуса судов из данных сталей не требуют сложного и дорогостоящего ухода и ремонта. Кроме того, низкоуглеродистые и низколегированные стали как правило обладают хорошей свариваемостью, что позволяет уменьшить количество технологических операций при сборке и сварке корпуса судна.

Чаще всего для маломерного судостроения используется сталь марки СтЗ (благодаря низкой стоимости) или стали, соответствующие ГОСТ 5521-93 [3], однако сталь марки 10ХСНД обладает повышенным пределом прочности, что позволяет уменьшить толщину связей набора и обшивки и тем самым облегчить всю конструкцию.

10ХСНД используется в промышленности для изготовления различных деталей и ответственных металлоконструкций, к которым предъявляются повышенные требования прочности и коррозионной стойкости, а также ограничения по массе, и работающих в широком диапазоне температур - от -70 до +425°C [9,10]. Согласно ГОСТ 5521-93 сталь 10ХСНД соответствует сталям повышенной прочности марок А40S, D40S, E40S. Химический состав и механические свойства представлены на таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Химический состав в % стали 10ХСНД по ГОСТ19281-2014

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As	Fe
до 0,12	0,8- 1,1	0,5- 0,8	0,5- 0,8	до 0,035	до 0,03	0,6 - 0,9	до 0,12	до 0,008	0,4 - 0,6	до 0,08	96

Таблица 3. Механические свойства стали 10ХСНД по ГОСТ 19281-2014

σ_B (Мпа)	σ_T (Мпа)	δ_5 (%)	KCU (T=-20°C) (Дж/см ²)
530	390	19	44

Сталь 10ХСНД обладает повышенными характеристиками пластичности и ударной вязкости, что имеет особое значение при работе металлоконструкции в условиях действия динамических и знакопеременных нагрузок (такие нагрузки действуют на корпус яхты в процессе её эксплуатации).

По сравнению с большинством других судостроительных сталей, 10ХСНД имеет повышенную стойкость к морской электрохимической коррозии [11], что позволит свести запас толщины обшивки на коррозионный износ к минимуму. Кроме того, рассчитаем показатель атмосферостойкости стали 10ХСНД по методу ASTM G101 (применим для сталей по ГОСТ 19281-2014) [12]:

$$CI = 26,01 \cdot Cu + 3,88 \cdot Ni + 1,20 \cdot Cr + 1,49 \cdot Si + 17,28 \cdot P - 7,29 \cdot Cu \cdot Ni \cdot P - 33,39 \cdot Cu^2 = 26,01 \cdot 0,6 + 3,88 \cdot 0,8 + 1,20 \cdot 0,9 + 1,49 \cdot 1,1 + 17,28 \cdot 0,03 - 7,29 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,03 - 33,39 \cdot 0,36 = 10,32$$

При индексе свыше 6 сталь является атмосферостойкой. Сталь 10ХСНД обладает повышенным индексом стойкости к атмосферной коррозии, для сравнения - сталь 09Г2С имеет индекс 8,1.

Качественное пассивирование поверхности металла позволит значительно увеличить срок эксплуатации корпуса яхты [13]. Кроме того, установка на поверхности корпуса судна анодов из цинка (протекторов), которые обладают большим отрицательным потенциалом, чем сталь, значительно снижает скорость коррозии в морской воде [13,14].

Применение термообработки (закалки, отжига, нормализации) [15] и различных методов упрочнения [16] может значительно улучшить механические свойства стали 10ХСНД.

Согласно ГОСТ 5521-93 общее содержание углерода и марганца в сталях, используемых в маломерном судостроении, не должно превышать 0,4% [3]:

$$C + (1/6) Mn \leq 0,4\%$$

Сталь 10ХСНД удовлетворяет этому условию:

$$0,12 + 0,133 = 0,253\%$$

Рассмотрим подробнее вопрос свариваемости стали 10ХСНД. Вероятность появления во время сварки горячих трещин определяется по показателю Уил-

кинсона (HCS) [17]:

$$HCS = 1000 \cdot C \cdot (S + P + Si/25 + Ni/100) / (3 \cdot Mn + Cr + Mo + V)$$

Для стали 10ХСНД при максимальных значениях содержания компонентов:

$$HCS = 1000 \cdot 0,12 \cdot (0,035 + 0,03 + 1,1/25 + 0,8/100) / (3 \cdot 0,8 + 0,9 + 0 + 0,12) = 4,10$$

При $H.C.S. \geq 4$ возникает вероятность появления горячих трещин. Следовательно, во время сварки стали 10ХСНД маловероятно образование горячих трещин.

Формулы углеродного эквивалента ($C_{эқв}$) позволяют определить склонность металла к образованию холодных трещин [18]. Для более точной оценки применим несколько формул углеродного эквивалента, а результаты сведем в таблицу 4.

1. Формула Международного института сварки (МИС):

$$C_{эқв1} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15.$$

2. Формула по ГОСТ 27772-88:

$$C_{эқв2} = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + Cu/13 + V/14 + P/2.$$

3. Формула по нормам РЖД для подвижного состава:

$$C_{эқв3} = C + Mn/6 + (Cr + V)/5 + Mo/4 + (Ni + Ca)/15 + Cu/13 + P/2.$$

4. Формула по нормативной документации Японии:

$$C_{эқв4} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4.$$

Таблица 4. Результаты расчета углеродного эквивалента

Значение содержания компонентов	Углеродный эквивалент, % по массе.			
	$C_{эқв1}$	$C_{эқв2}$	$C_{эқв3}$	$C_{эқв4}$
Максимальное	0,55	0,57	0,57	0,50
Среднее	0,40	0,43	0,42	0,37
Минимальное	0,26	0,28	0,27	0,25

Общий углеродный эквивалент для средних значений содержания компонентов рассчитывается по формуле¹:

$$C_{06} = C_3 \cdot (1 + 0,005 \cdot \delta) = 0,40 \cdot 1,03 = 0,412 \%,$$

где δ - толщина металла свариваемой детали, мм.

Согласно классификации сталей по свариваемости [19], сталь 10XCHД относится ко 2 группе свариваемости и обладает удовлетворительной свариваемостью. Следовательно, необходимы подогрев перед сваркой и термообработка после сварки, желательна также термообработка перед сваркой.

Рассчитаем температуру предварительного подогрева:

$$T = 350 \cdot (C_{06} - 0,25)^{1/2} = 350 \cdot 0,4 = 140^\circ\text{C}$$

Кроме того, определим углеродный эквивалент и свариваемость стали 10XCHД по методу британской ассоциации по исследованиям в области сварки (BWRA) [20]:

$$C_s = C + \text{Mn}/20 + \text{Cr}/10 + \text{Mo}/10 + \text{V}/10 + \text{Ni}/15 = 0,12 + (0,8/20) + (0,9/10) + (0,12/10) + (0,8/15) = 0,31$$

Согласно данному методу сталь 10XCHД принадлежит к 3 группе свариваемости и склонна к образованию холодных трещин, сваривается с подогревом от 50 до 175°C.

При конструировании обшивки корпуса из стали и создании технологии сборки и сварки учитывается тот факт, что опасность хрупкого разрушения обшивки маломерных судов меньше, чем у крупных, так как используются листы малых толщин и их эксплуатация не связана с низкими температурами [3].

Проанализировав свариваемость стали 10XCHД, приняв во внимание максимальную толщину обшивки судна (не более 6 мм) [19], а также целесообразность применения подогрева и термообработки при сварке корпуса яхты принято решение применить предварительный подогрев наиболее ответственных и напряженных элементов корпуса яхты: форштевень, днище, ахтерштевень. При этом, запрещается сварка при температуре окружающей среды ниже 5°C.

¹ Взята максимальная предполагаемая толщина обшивки судна

Кроме вышеперечисленных показателей важным критерием свариваемости является твердость зоны термического влияния (HV) которая рассчитывается по формуле:

$$HV_{\max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr.$$

Для 10ХСНД, при максимальных значениях содержания компонентов:

$$HV_{\max} = 90 + 1050 \cdot 0,12 + 47 \cdot 1,1 + 75 \cdot 0,8 + 30 \cdot 0,8 + 31 \cdot 0,9 = 379,6.$$

При значении показателя выше 350, возникает вероятность образования холодных трещин в ЗТВ. Следовательно, сталь 10ХСНД мало склонна к охрупчиванию зоны термического влияния.

Вывод: сталь 10ХСНД обладает удовлетворительной свариваемостью и обладает вероятностью появления горячих и холодных трещин, не флокеночувствительна и имеет малую склонность к отпускной хрупкости, может свариваться любыми способами сварки.

На основании вышеприведенного анализа, в качестве основного материала для корпуса парусной яхты была выбрана низколегированная конструкционная сталь 10ХСНД.

Для изготовления корпуса яхты из стали 10 ХСНД применяются следующие виды проката:

- прокат листовой холоднокатаный по ГОСТ 19904-90,
- прокат листовой горячекатаный по ГОСТ 19903-74,
- прокат сортовой горячекатаный полосовой по ГОСТ 103-2006,
- уголки горячекатаные неравнополочные по ГОСТ 8510-86.

Технические условия на данный прокат регламентируются ГОСТ 19281-2014 и ГОСТ 17066-94.

2.3. Конструирование набора судна

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к маломерным судам ГИМС России, конструкция корпуса судов первого класса обязательно предусматривает наличие набора [21].

Набор корпуса судна конструируется согласно требованиям стандартов и рекомендациям специализированной литературы в зависимости от выбранного материала и водоизмещения, а также на основании принятой технологии постройки [22]. При этом необходимо выбрать следующие параметры набора корпуса судна:

1. Основная система набора:
 - a. продольная (стрингеры, карлингсы)
 - b. поперечная (шпангоуты, бимсы, флоры)
2. Шпация – расстояние между шпангоутами (принимается на основании рекомендаций Морского Регистра).
3. Количество шпангоутов (рассчитывается на основании длины судна и принятой шпации).
4. Количество скул (исходя из теоретического чертежа).
5. Размеры связей набора – высоту, ширину, толщину шпангоутов и стрингеров.

Главной задачей при конструировании корпуса маломерного судна является его оптимизация. При этом необходимо [3, 22]:

1. уменьшить влияние сварочных деформаций и напряжений, не выходя за рамки принятого водоизмещения и массы конструкции;
2. снизить число технологических операций при сборке и сварке конструкции, не навредив прочности и безопасности будущего корпуса

яхты;

3. ограничивать число типоразмеров проката;

4. учитывать места дальнейшей установки пиллерсов и переборок судна.

Для судов длиной до 12 метров размер связей набора определяется согласно статистическим данным, данным судна-прототипа или расчетными методами. Современные системы автоматизированного проектирования позволяют рассчитать размеры связей набора для заданной прочности корпуса маломерного судна и оптимизировать конструкцию.

В качестве основной системы набора выбрана поперечная с элементами продольной (смешанная) – шпангоуты и стрингера. Такая система набора наиболее технологична, упрощается разметка и стыковка секций, яхта лучше воспринимает поперечные нагрузки, лучше обеспечивается местная прочность корпуса судна при его ударе о препятствие [22, 23].

Наиболее рациональным видом проката для изготовления тимберсов¹ и бимсов² шпангоутной рамы из стали 10ХСНД является неравнополочный уголок по ГОСТ 8510-86. Такой прокат позволяет уменьшить высоту профиля балок набора по сравнению с полосой и обладает меньшей себестоимостью и большей технологичностью по сравнению со сварными таврами [3]. Для изготовления флор³ применяется лист по ГОСТ 19903-74. Балки поперечного набора замыкаются в рамы стыковым соединением [23], так как в её составе они становятся прочнее из-за разгружающего действия угловых моментов. Флоры выполняются из пластин переменной высоты⁴ с приваренным пояском (фланцем) [3].

Для изготовления стрингеров применяется полоса по ГОСТ 103-2006, она обладает меньшей стоимостью по сравнению с фасонным прокатом, а также

¹ Ветви шпангоута.

² Поперечная балка, связывающая бортовые ветви шпангоута.

³ Поперечные днищевые балки.

⁴ Не менее 1/18 ширины судна, измеренной между точками пересечения линии пояска флора и обшивки.

позволяет значительно снизить число технологических операций при сборке и сварке набора корпуса судна и упростить узлы пересечения балок [3].

Рассчитаем шпацию для заданного проекта судна на основе теоретического чертежа и главных размерений по эмпирической формуле Морского Регистра [22, 23]:

$$A_0 = (0,002 \cdot L + 0,48) \pm 25\%, \text{ м,}$$

где L – длина судна.

$$A_0 = (0,002 \cdot 10 + 0,48) = 0,5 \text{ м.}$$

Размеры связей набора приняты минимально допустимыми для заданной длины яхты из стали 10ХСНД в соответствии с рекомендациями [3].

В итоге приняты следующие параметры набора корпуса яхты:

1. Шпация: 500 мм.
2. Количество шпангоутов: 18.
3. Количество скул: 4
4. Размеры балок шпангоутной рамы: 30x20x4,0 мм.
5. Размеры флора мидельшпангоута¹: 110x20x4,0 мм.
6. Размеры балок продольного набора: 26x4,0 мм.

На рис. 8 представлено направление полок шпангоутов в соответствии с рекомендациями [5]. Соединение поперечных балок набора выполняется встык [23].

Согласно принятым параметрам выполнена эскизная проработка набора корпуса яхты (Рис. 9), на основании которой в САПР КОМПАС-3D создана 3D-модель набора (Рис.10) и чертежи шпангоутов. Чертежи рамы мидельшпангоута и набора корпуса яхты представлены на рис. 11 и рис. 12 соответственно.

¹ Средний шпангоут судна.

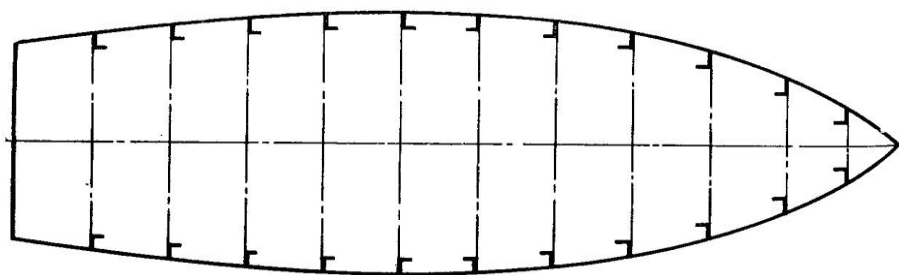


Рис. 8. Направление полок шпангоутов стального корпуса яхты

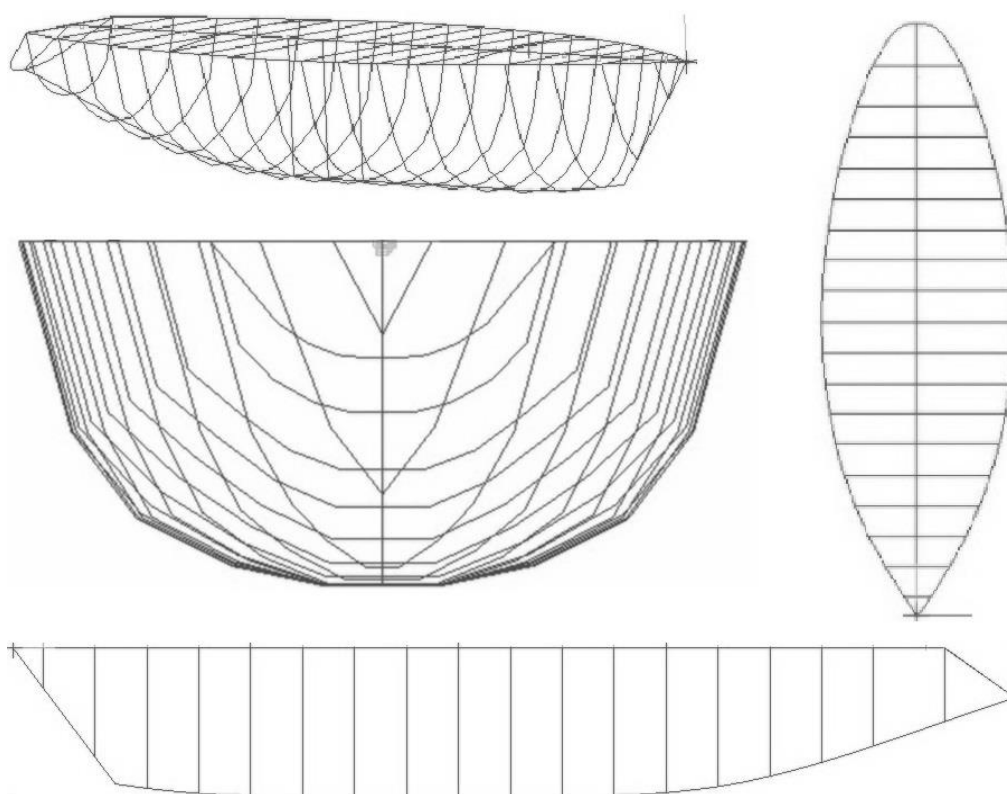


Рис. 9. Эскизы набора корпуса парусной яхты

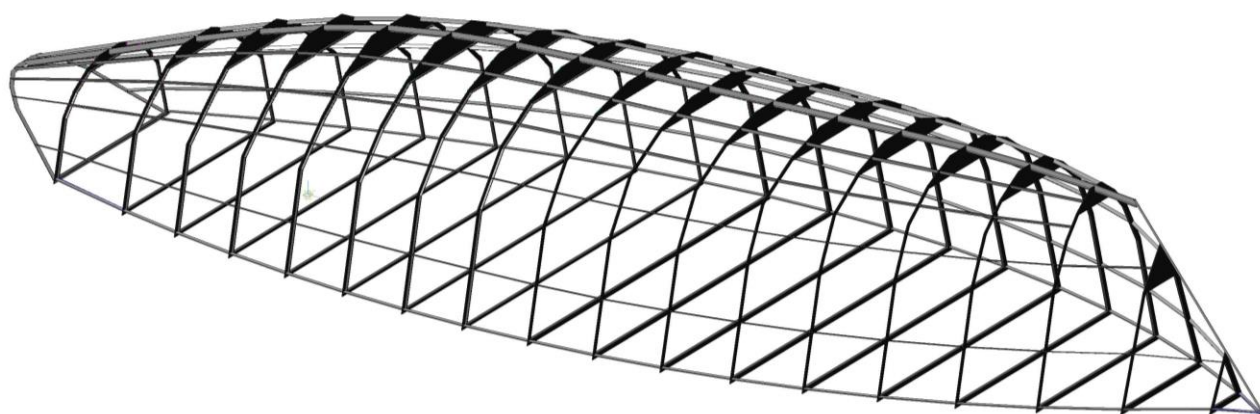


Рис. 10. Модель набора корпуса парусной яхты

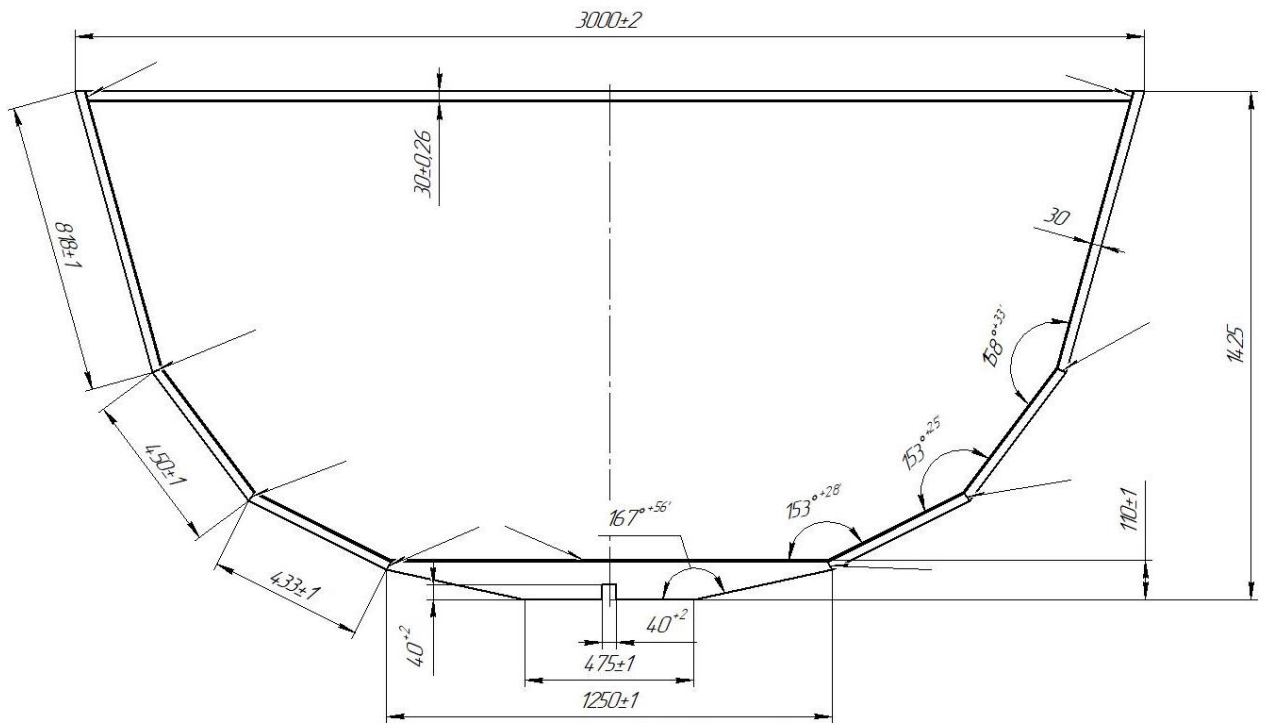


Рис. 11. Чертеж мидельшпангоута яхты

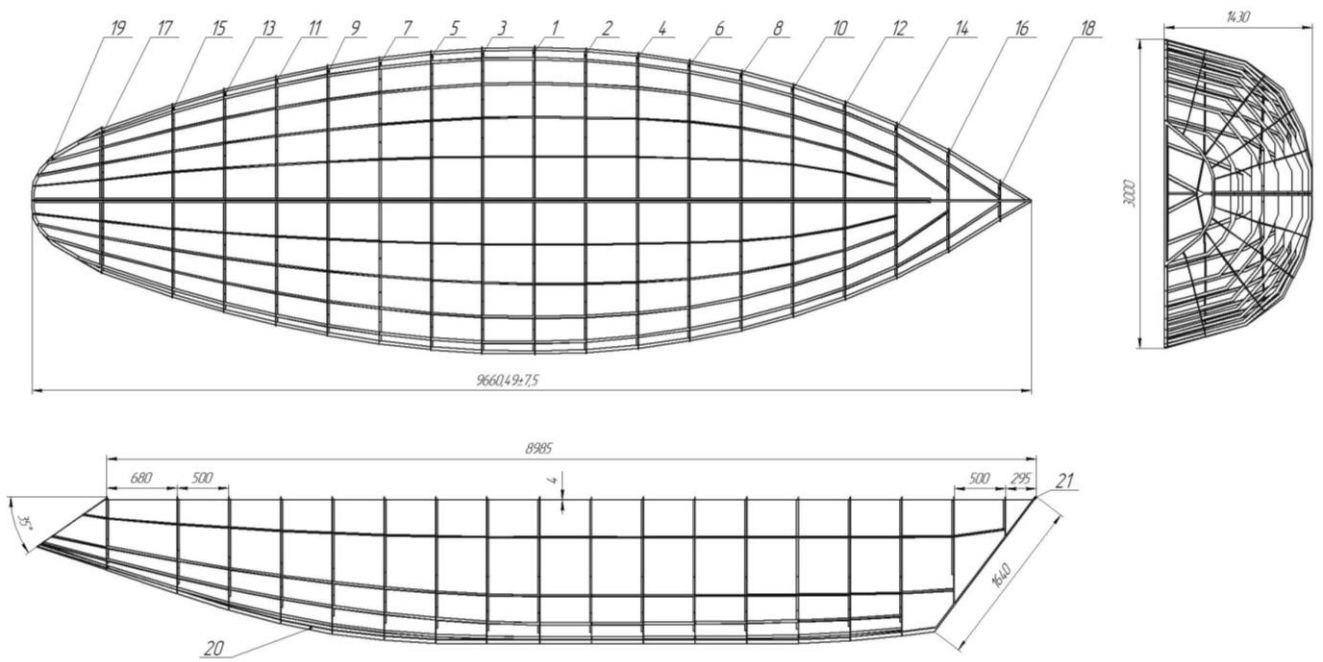


Рис. 12. Чертеж набора корпуса яхты

2.4. Конструирование обшивки корпуса судна

Конструирование обшивки корпуса парусной яхты является одним из наиболее ответственных этапов проектирования. Обшивка воспринимает большую часть нагрузок на корпус яхты и испытывает наибольшее влияние коррозии. Кроме того, возникающие в процессе сварки обшивки деформации и напряжения могут не только снизить общую прочность корпуса, но и ухудшить ходовые характеристики яхты.

Правильный выбор толщины обшивки на различных поясах корпуса яхты и способа соединения поясов позволяет оптимизировать конструкцию, улучшить ходовые качества яхты, повысить её прочность и безопасность (не увеличивая при этом водоизмещение), а также уменьшить деформации и напряжения. Учитывается также и то, что все гибочные работы должны производиться без нагрева листов обшивки [5]. Корпус проекта яхты состоит из следующих поясов обшивки, для которых необходимо выбрать толщину и способ соединения:

1. Ширстрек – верхний пояс обшивки судна, граничащий с палубой.
2. Бархоут – пояс в районе главной ватерлинии.
3. Скуловой пояс – средний пояс обшивки, идущий по скуле судна.
4. Шпунтовый пояс – соседний с килевым пояс.
5. Килевой (днищевой) пояс – пояс, проходящий в диаметральной плоскости судна и служащий его днищем.

Обшивка стального маломерного судна раскраивается из прокатных листов, которые располагаются вдоль корпуса судна длинной стороной [3, 22]. Такая компоновка позволяет снизить общие напряжения в корпусе яхты и упростить его сборку и сварку. Габариты листов выбираются с учётом технологических соображений: общая трудоёмкость гнутья листов, обработки кромок, сборки и сварки должна быть минимальной [3].

сти маломерных судов» устанавливают особые требования к толщине обшивки маломерных судов первого класса вне зависимости от механических свойств стали [21, 24]:

- минимальная толщина обшивки стального корпуса составляет 3 мм;
- минимальная толщина стенок балок набора металлических маломерных судов должна быть не меньше минимальной толщины наружной обшивки корпуса маломерного судна.

Кроме того, Морской Регистр предъявляет требования для сварных соединений листов обшивки [3, 23]:

1. Необходимо обеспечить плавное изменение размеров профилей и толщин листов. Разница толщин не должна превышать 30%.
2. Угол между двумя стыковыми швами должен быть не менее 60° .
3. Расстояние между двумя параллельными стыковыми швами должно быть не менее 200 мм, между параллельными стыковыми и угловыми соединениями не менее 75 мм.

Однако для судов длиной до 12 метров от этих требований можно отступить и принять их в качестве рекомендаций.

Исходя из вышеперечисленных требований и рекомендаций, выбрана следующая толщина поясов обшивки:

1. Ширстрек – 3 мм.
2. Бархоут – 3 мм.
3. Скуловой пояс – 3 мм.
4. Шпунтовый пояс – 4 мм.
5. Килевой пояс (днище) – 6 мм.

Толщина обшивки на днище и шпунтовом поясе увеличивается для повышения остойчивости, а также безопасности судна при столкновении с подводными препятствиями.

Пояса обшивки соединяются между собой с небольшим нахлестом (Рис. 13). По сравнению со стыковым соединением такая конфигурация позволит значительно сократить затраты на сборку и подгонку листов обшивки, а также увеличить продольную прочность корпуса яхты.

На основании принятых параметров в САПР КОМПАС-3D создана 3D-модель листов обшивки (Рис. 14), а также модель корпуса (Рис. 15) и общая модель проекта парусной яхты (Рис. 16). В днище предусмотрено отверстие для гелмпорта¹ и вырез для швертового колодца килевой системы яхты [25, 26, 27].

В САПР Free!Ship выполнена развертка листов обшивки корпуса на плоскость, а также их раскрой из горячекатаных листов 1250x2500 и 1250x6000 по ГОСТ 19903-74 (Рис. 17).

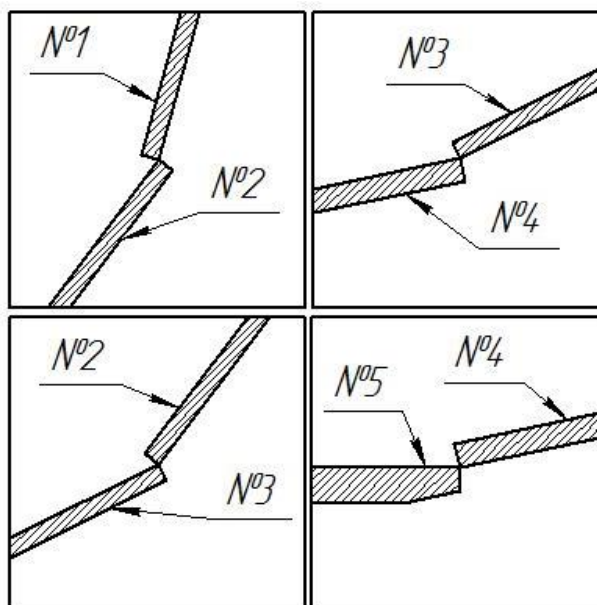


Рис. 13. Соединение поясов обшивки, где:

1-ширстрек, 2-бархоут, 3-скуловой пояс, 4-шпунтовый пояс, 5-днище

¹ Труба, через которую проходит баллер (ось) руля.

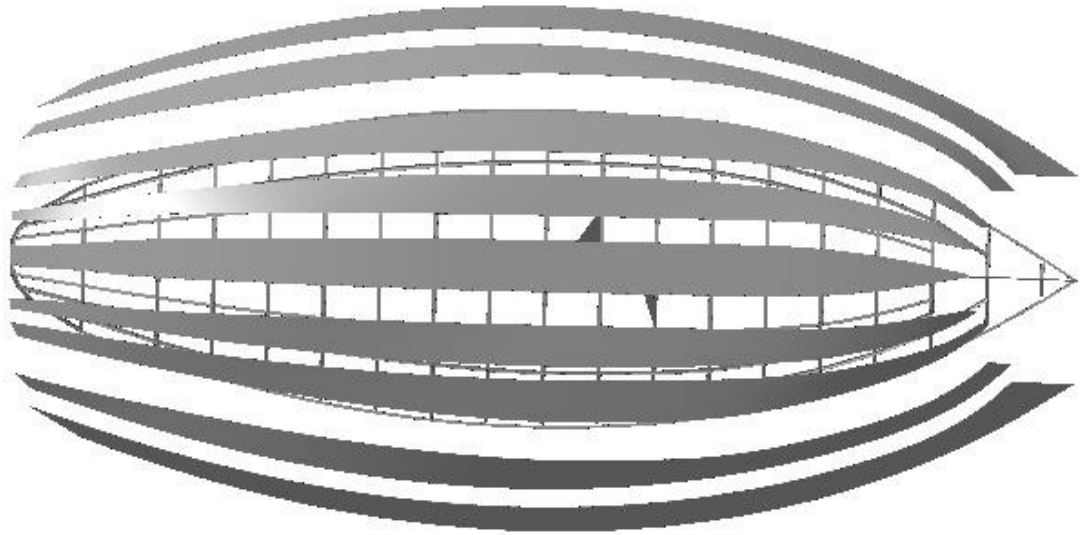


Рис. 14. Модель листов обшивки корпуса парусной яхты

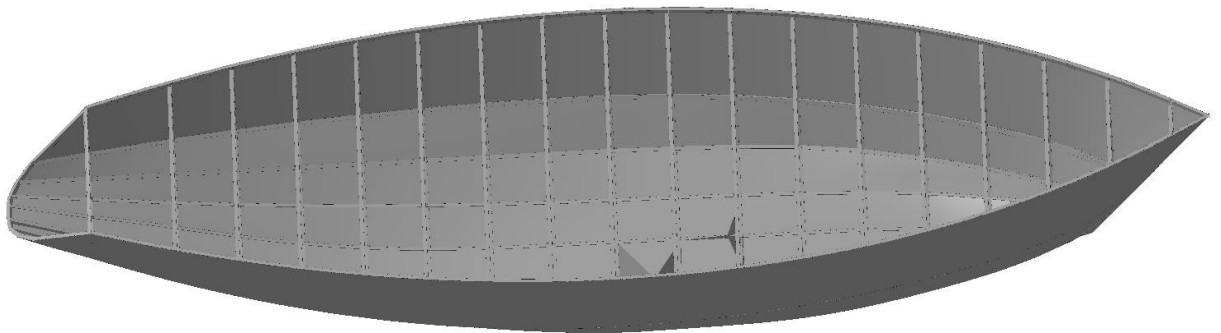


Рис. 15. Модель корпуса парусной яхты

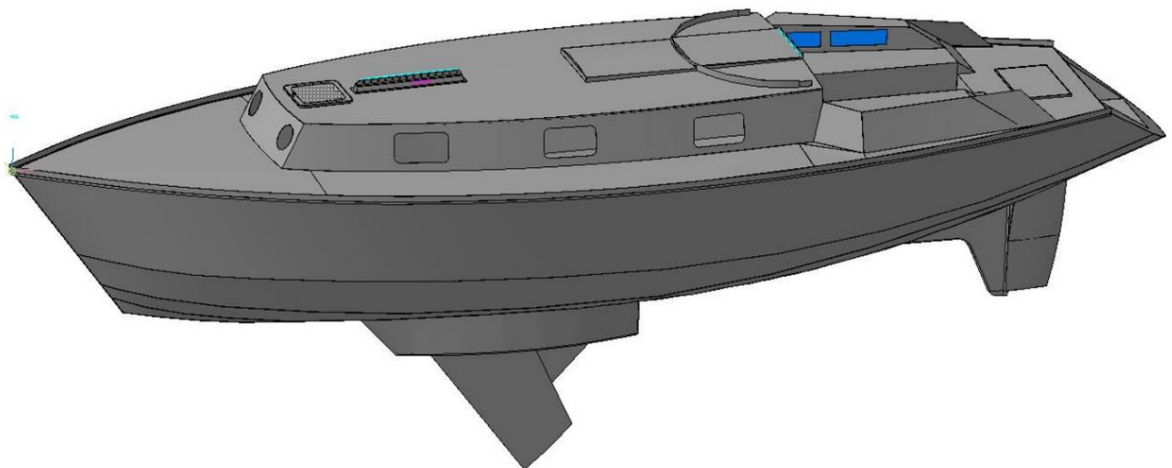


Рис. 16. Модель проекта парусной яхты

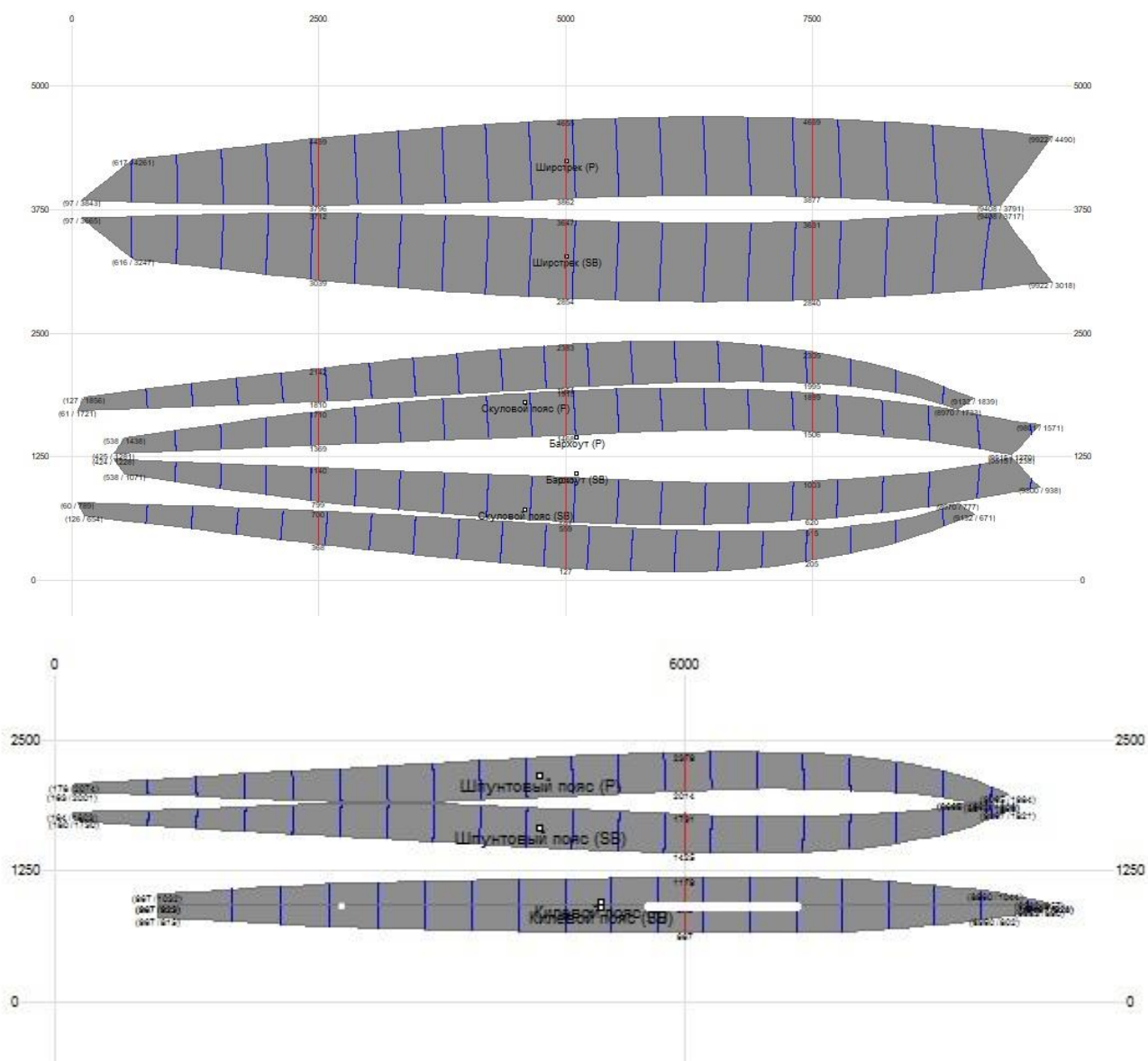


Рис. 17. Развертки и раскрой листов обшивки корпуса парусной яхты

Для выполнения расчетов на прочность в САПР КОМПАС 3D создана модель средней секции корпуса яхты (Рис. 18) длиной в три шпации (примерно 1/6 от общей длины яхты, 1500 мм). Затем в библиотеке АРМ-FEM выполнена разбивка секции на конечные элементы (Рис. 19) и произведен прочностной расчёт при действии равномерно распределённой нагрузки на всю секцию, а также при действии нагрузки на отдельные пояса обшивки.

Расчеты показали, что секция корпуса выдерживает равномерно распределённую нагрузку в 20^1 кН с минимальным коэффициентом запаса по текучести

¹ Максимальная нагрузка, действующая на секцию яхты в штормовых условиях

4, максимальной деформацией 0,14 мм (Рис. 20) и максимальными напряжениями 109 МПа.

Результаты расчета при приложении отдельно к каждому поясу нагрузки силой 75 кН¹ приведены в таблице 5.

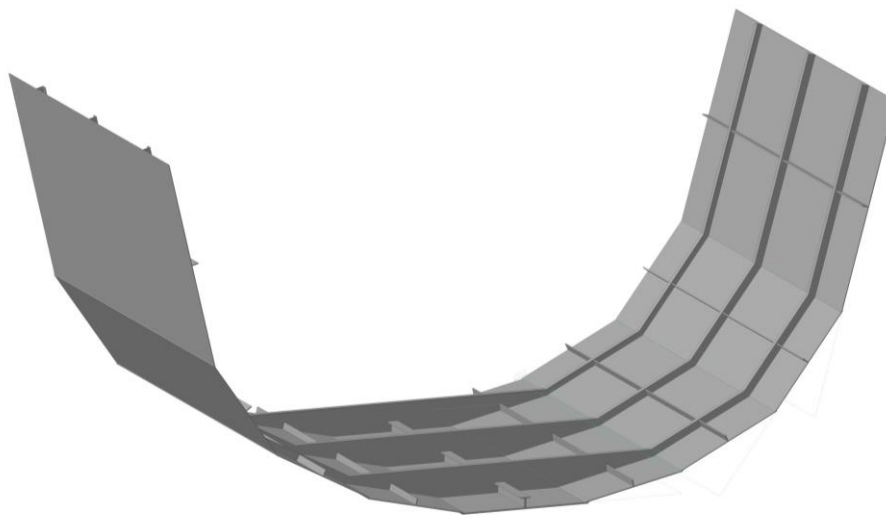


Рис. 18. Секция корпуса яхты

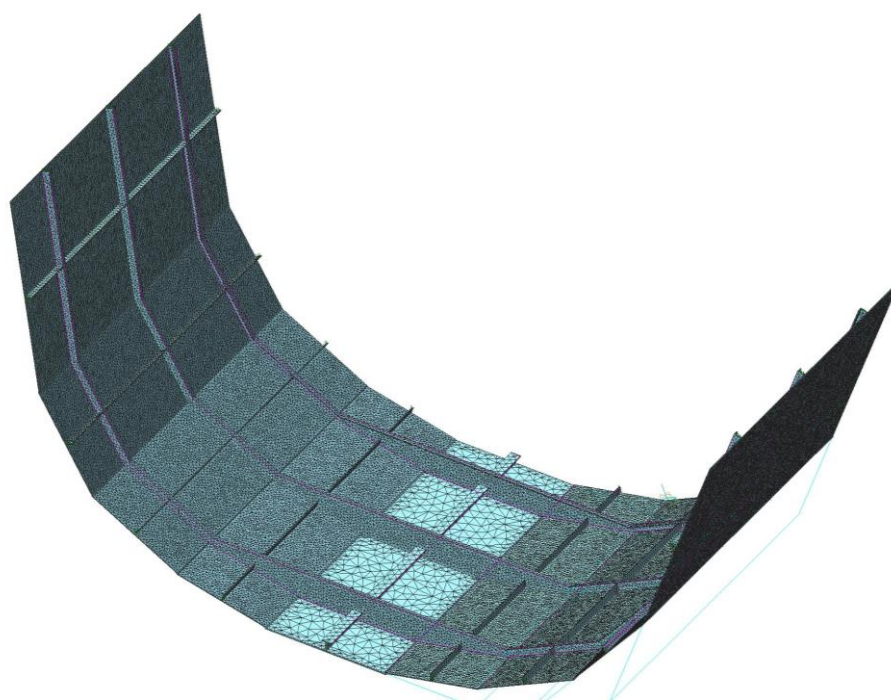


Рис. 19. Сетка конечных элементов секции яхты

¹ Сила в 75 кН сравнима с силой столкновения с препятствием яхты водоизмещением 5 т на скорости 3 узла (1,543 м/с).

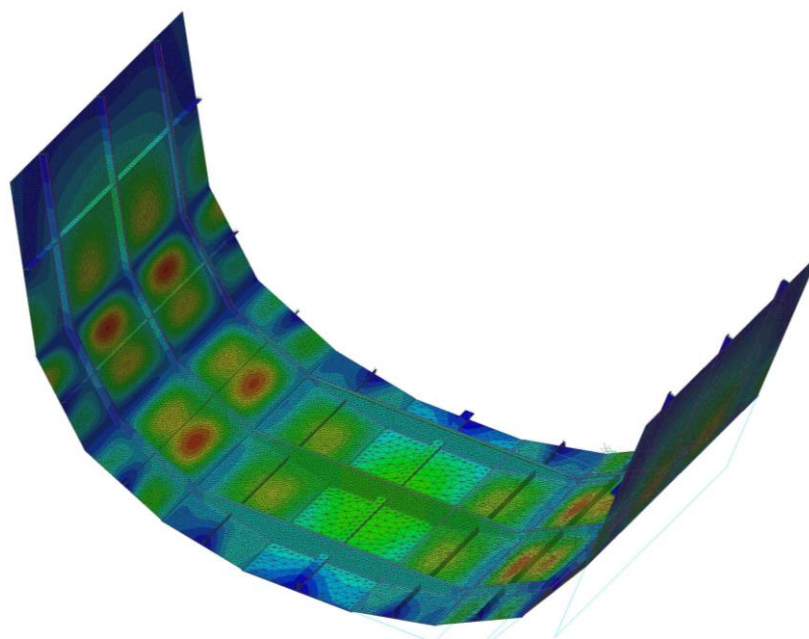


Рис. 20. Деформации секции при действии равномерной нагрузки

Таблица 5. Результаты прочностного расчета при приложении нагрузки к поясам обшивки

Пояс	Максимальные деформации, мм	Максимальные напряжения по Мизесу, МПа	Минимальный коэффициент запаса по пределу текучести
Днище	1,8	412	1,1
Шпунтовый пояс	5,3	700	0,5
Скуловой пояс	6,6	1000	0,4
Бархоут	6,3	1050	0,4
Ширстрек	16,3	800	0,5

Анализ результатов показал, что сконструированный корпус яхты имеет достаточно высокую общую прочность, что говорит о правильности выбора материала конструкции, размеров связей набора, толщины обшивки и способа соединения поясов обшивки.

Согласно исследованиям [11] средняя скорость коррозии стали 10ХСНД при отсутствии пассивирующего покрытия и анодной электрохимической защиты в спокойной среде составляет 0,069мм/год, а при эксплуатации в сложных условиях (испытание в морской воде с $T=32^{\circ}\text{C}$ и скоростью 10м/с) – 0,7 мм/год. Металл сварного шва при этом корродирует быстрее – до 0,9 мм/год. Речной Регистр [28] требует замены обшивки, потерявшей 20% своей первоначальной толщины (для толщины 3 мм это 0,6 мм). Таким образом, не допускается длительная эксплуатация яхты с повреждёнными пассивирующим покрытием и электрохимической защитой. Однако установка цинковых анодов и качественная покраска яхты, а также своевременный уход за ними могут сделать срок службы корпуса яхты практически неограниченным.

2.5. Выбор параметров сварных соединений

Для обеспечения достаточной прочности, уменьшения деформаций и напряжений, а также оптимизации технологии сборки и сварки необходимо выбрать следующие параметры для отдельных сварных соединений разработанного корпуса яхты:

- Протяженность сварного шва: непрерывный, прерывистый.
- Способ выполнения: односторонний, двусторонний.
- Для прерывистых швов: расположение участков шва (шахматный, цепной), их длину и шаг.
- Для угловых соединений - катет шва, для стыковых соединений - ширину шва.

Для определения катетов угловых сварных швов применим формулу Регистра (с некоторой экстраполяцией) [3]:

$$K = \alpha \beta s,$$

где α - коэффициент ответственности сварного соединения, принимаемый от 0,1 до 0,45; β – коэффициент протяженности сварного шва, принимаемый для одностороннего прерывистого¹ - $2t/l$, для шахматного и двустороннего прерывистого – t/l , для непрерывного двустороннего – 1; s – меньшая из толщин соединяемых деталей.

При сварке листов обшивки с набором рекомендуется применение прерывистых сварных швов [3, 5]. Такие швы вызывают значительно меньшие деформации по сравнению с непрерывными швами такого же катета [29, 30]. Кроме того, двусторонний прерывистый шов при той же длине участков и при том же их количестве, как и в двустороннем шахматном шве, также вызывает меньшие деформации элемента [31].

Для прерывистого цепного шва на основании размеров связей корпуса яхты принимаем: длина - 40 мм, шаг – 80 мм.

Наиболее ответственными соединениями для данной конструкции корпуса судна являются соединения флор и шпангоутов ($\alpha = 0,45$). Соединения стрин-

¹ t – шаг шва, мм; l – длина шва, мм.

геров являются менее ответственными ($\alpha = 0,3$) [3].

Рассчитаем катеты для угловых соединений стрингеров с поясами обшивки, толщиной 3 мм:

$$K = 0,3 \cdot 2 \cdot (80/40) \cdot 3 = 3,6 \text{ мм}$$

Согласно ГОСТ 14771-76 для соединений Т1 принимаем катет 4 мм.

Для соединения стрингеров со шпунтовым поясом толщиной 4 мм:

$$K = 0,3 \cdot 2 \cdot (80/40) \cdot 4 = 4,8 \text{ мм} \approx 5 \text{ мм.}$$

Катет углового шва для соединений шпангоутов и поясов обшивки толщиной 3 мм:

$$K = 0,45 \cdot (80/40) \cdot 3 = 2,7 \text{ мм}$$

Согласно ГОСТ 14771-76 для соединений Т3 принимаем катет 3мм.

Катет углового шва для соединений шпангоутов и шпунтового пояса толщиной 4 мм, а также шпангоутов и днища толщиной 6 мм:

$$K = 0,45 \cdot (80/40) \cdot 4 = 3,6 \text{ мм} \approx 4 \text{ мм.}$$

Катет шва для соединения киля с днищем:

$$K = 0,45 \cdot (80/40) \cdot 6 = 5,4 \text{ мм} \approx 5 \text{ мм}$$

Для соединений поясов обшивки нестандартным сварным швом примем катет равным толщине соединяемых листов.

В итоге, на основании рекомендаций Морского Регистра и ГОСТ 14771-76, для сварных соединений корпуса яхты приняты следующие геометрические параметры, приведенные на рис. 21-28.

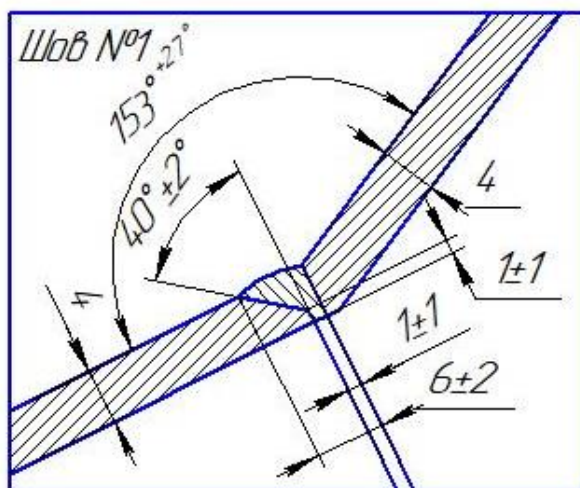


Рис. 21. Соединения шпангоутной рамы (Шов №1)

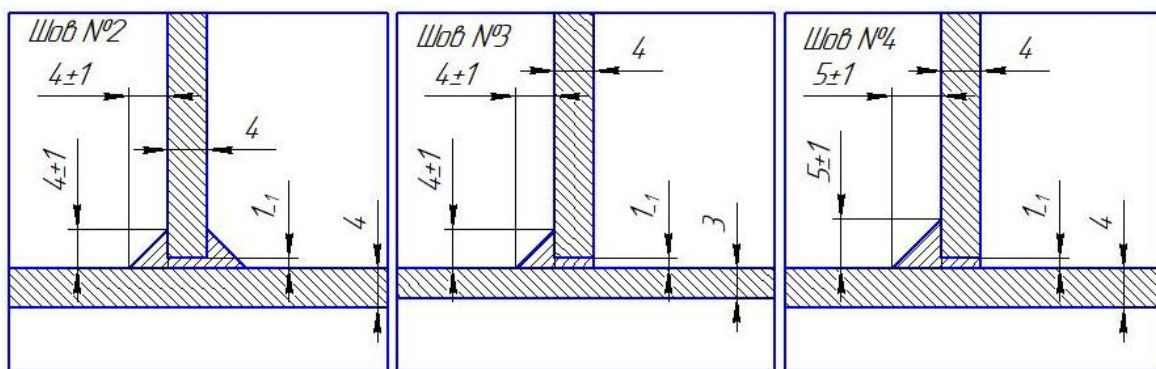


Рис. 22. Соединения стрингеров со шпангоутами и поясами обшивки (Швы №2-4)

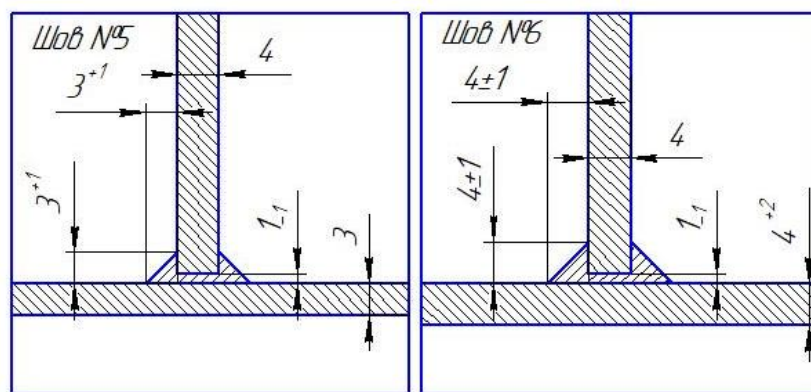


Рис. 23. Соединения шпангоутов с поясами обшивки (Швы №5,6)

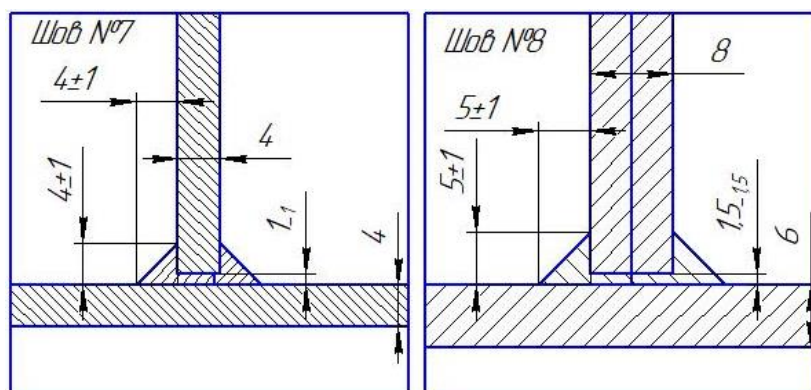


Рис. 24. Соединение киля с флорами и днищем (Швы №7,8)

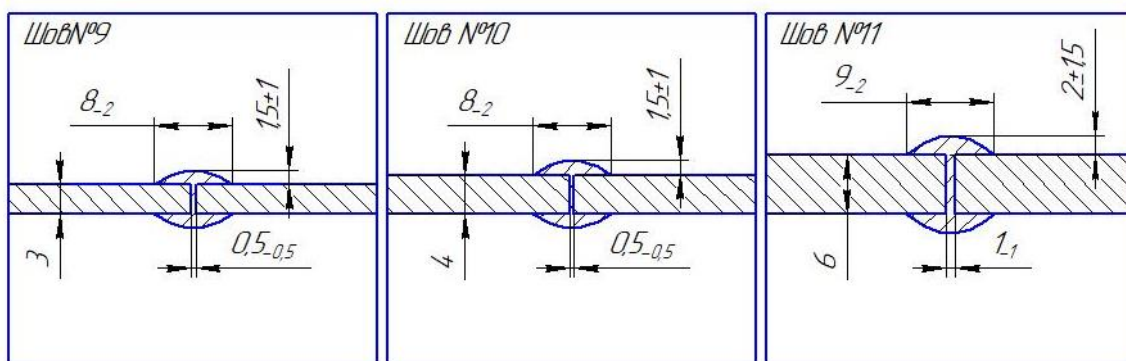


Рис.25. Соединение листов поясов обшивки (Швы №9-11)

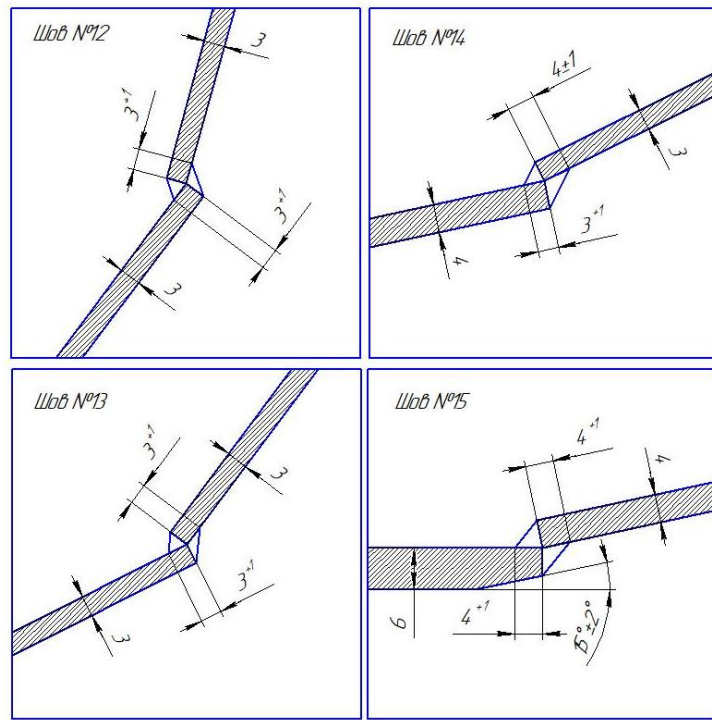


Рис. 26. Соединения поясов обшивки между собой (Швы №12-15)

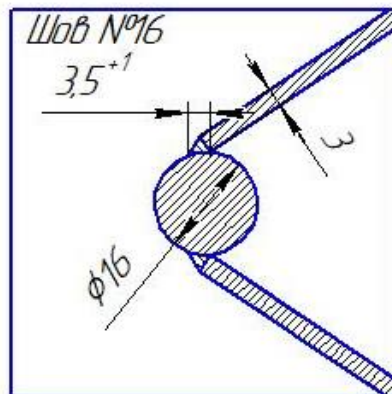


Рис. 27. Соединение форштевня с поясами обшивки (Шов №16)

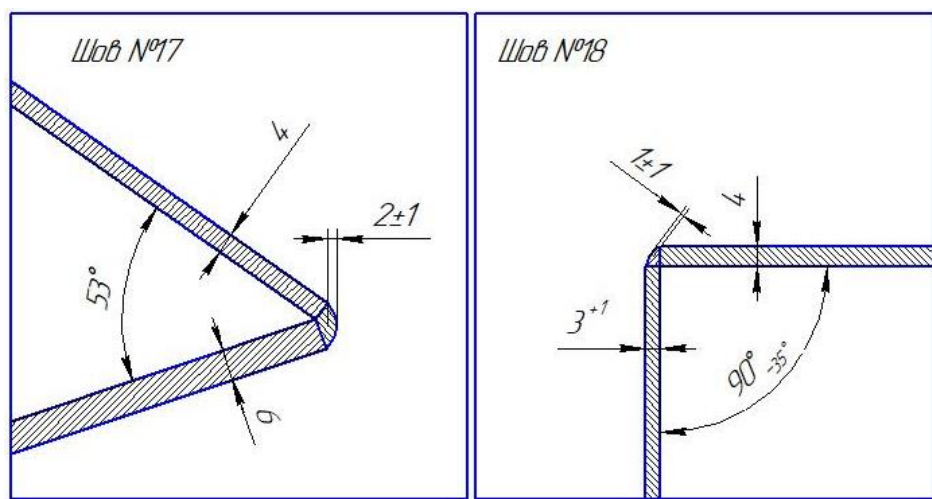


Рис. 28. Соединение транцевого шпангоута и поясов обшивки (Швы №17,18)

2.6. Расчет ходовых качеств проектируемого судна

Расчет основных гидродинамических характеристик, а также гидростатики судна производится с помощью специализированного программного обеспечения на основании модели корпуса судна. Эти характеристики определяют как судно будет себя вести в различных ситуациях на воде, а также насколько оно безопасно для эксплуатации.

Расчет остойчивости и сопротивления корпуса выполнен с помощью САПР Free!Ship [32], в результате были получены диаграммы статической и динамической остойчивости (Рис. 29), а также график зависимости сопротивления от скорости (Рис. 30). Полученные данные позволяют судить о высоких мореходных качествах корпуса парусной яхты, большой остойчивости и малой буксировочной мощности¹. Корпус яхты достаточно безопасен даже при отсутствии балласта, при этом остойчивость парусной яхты значительно увеличивается после установки балластного киля.

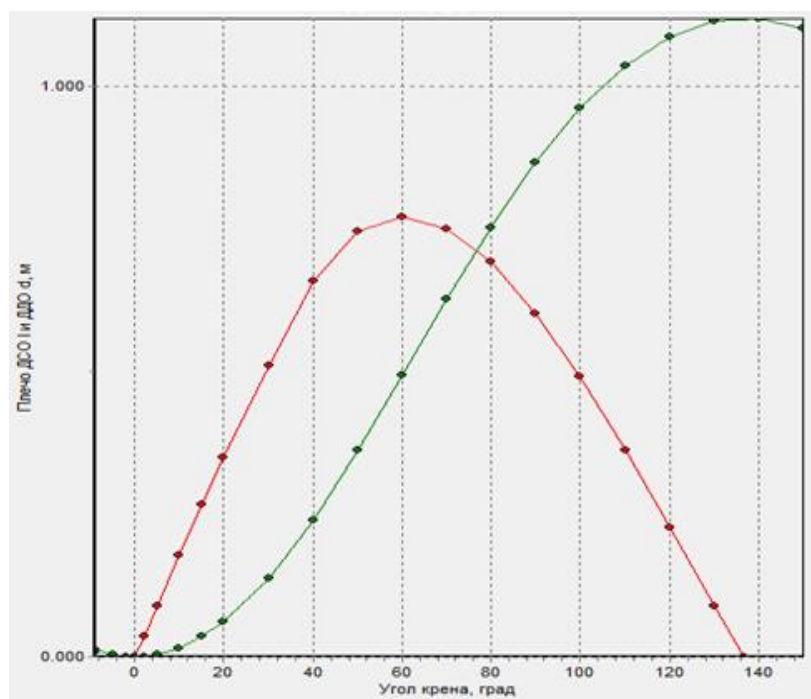


Рис. 29. Диаграммы статической и динамической остойчивости корпуса яхты

¹ Наименьшая мощность, необходимая для преодоления силы сопротивления движению судна с определённой скоростью.

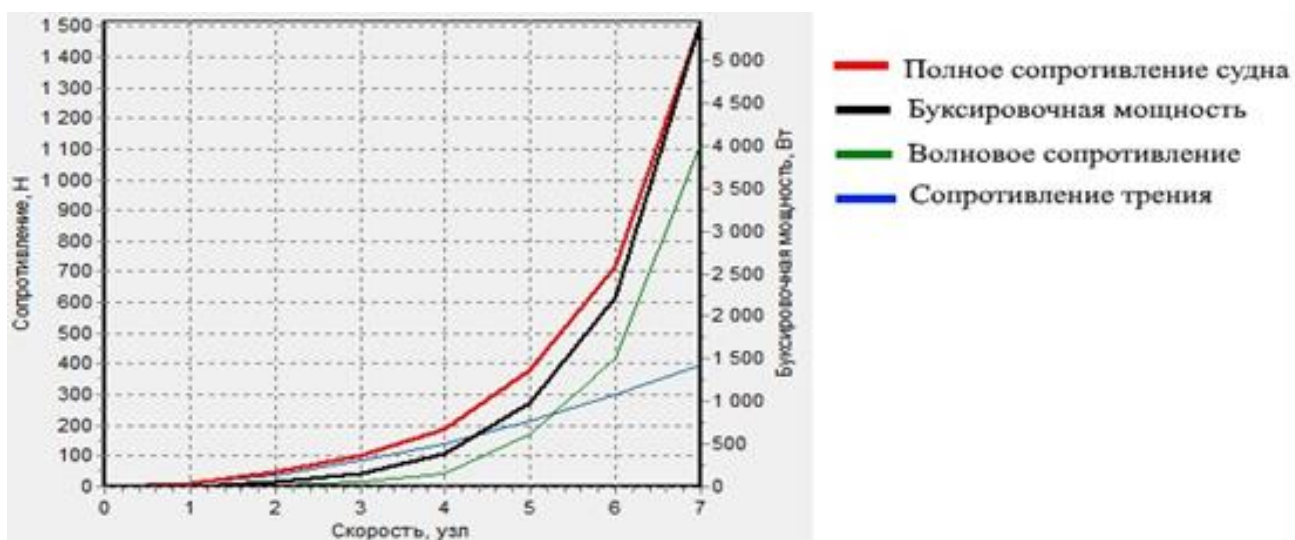


Рис. 30. График зависимости сопротивления от скорости

Глава 3. Разработка технологического процесса сборки и сварки корпуса судна

3.1. Выбор способа сварки и расчет режимов

Для выполнения сборки и сварки стальных корпусов маломерных судов наиболее оптимальными способами сварки являются ручная дуговая сварка плавящимся покрытым электродом (ММА) и частично механизированная сварка в среде защитных газов (MAG) [5]. Однако частично механизированная сварка обладает рядом преимуществ по сравнению с ручной дуговой [33, 34]:

- высокая скорость сварки и производительность;
- меньшие сварочные деформации и напряжения за счет сравнительно невысокой погонной энергии;
- надёжная защита сварочной ванны, отсутствие шлака и связанных с ним дефектов (шлаковые включения);
- не требуется высокая квалификация сварщика.

В итоге, в качестве основного способа сварки стального корпуса парусной яхты выбрана частично механизированная сварка в среде защитных газов, так как она является наиболее технологичной для данной конструкции [33, 34].

Для данного способа сварки необходимо выбрать следующие параметры режима сварки [34, 35, 36]:

1. Диаметр электродной проволоки, $d_{эл}$, мм.
2. Сила сварочного тока, $I_{св}$, А.
3. Скорость сварки, $V_{св}$, м/ч.
4. Напряжение на дуге, $U_{д}$, В.
5. Вылет электродной проволоки, l_3 , мм.
6. Скорость подачи электродной проволоки, $V_{пр}$, м/ч.
7. Расход защитного газа, $q_г$.
8. Род и полярность тока.

Рассчитаем параметры режима сварки для сварных соединений корпуса

якты [35, 36, 37] и занесём их в таблицу 6:

1. Рекомендуемый диаметр электродной проволоки для стали толщиной от 4 до 6 мм является 1,2 мм. Для сварки листов обшивки толщиной 3 мм примем диаметр сварочной проволоки равным 1 мм. На основании принятых диаметров будут производиться дальнейшие расчеты параметров режима.
2. Определим силу сварочного тока ($I_{св}$) для сварочной проволоки диаметров 1,2 мм по формуле:

$$I_{св} = \frac{\pi d_{э}^2 a}{4},$$

где $a = 110 \dots 130 \frac{A}{мм^2}$ - плотность тока в электродной проволоке; $d_{э}$ - диаметр электродной проволоки.

Отсюда:

$$I_{св} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 130}{4} = 147 \text{ А}$$

Для проволоки диаметром 1 мм расчетная сила сварочного тока составит 102 А.

3. Так как сварочная горелка перемещается вручную, параметр скорости сварки жестко не контролируется, однако его расчет необходимо выполнить.

Скорость сварки ($V_{св}$) определяется по формуле:

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св.}}{100 \cdot F_n \cdot \rho},$$

где α_n - коэффициент наплавки ($г/А \cdot ч$); F_n - площадь поперечного сечения наплавленного металла шва ($см^2$); ρ - плотность наплавленного металла = $7,85 \text{ г/см}^3$.

Коэффициент наплавки определяется по формуле:

$$\alpha_n = \alpha_p (1 - \psi),$$

где $\psi = 0,1 \dots 0,15$ - коэффициент потерь металла на угар и

разбрызгивание; α_p - коэффициент расплавления проволоки (г/А · ч).

$$\alpha_p = 3 + 0,08 \cdot \frac{I_{св}}{d_s} = 3 + 0,08 \cdot \frac{147}{1,2} = 12,8 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$$

Для проволоки диаметром 1 мм коэффициент расплавления составит 11,16 г/А · ч.

Следовательно:

$$\alpha_n = \alpha_p (1 - \psi) = 12,8 \cdot (1 - 0,13) = 11,14 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$$

Для проволоки диаметром 1 мм коэффициент наплавки составит 9,71 г/А · ч.

Для соблюдения принятых геометрических параметров сварных соединений корпуса яхты необходимо рассчитать скорость сварки для каждого из них¹:

1. Соединения шпангоутной рамы – шов №1:

$$V_{св} = \frac{11,14 \cdot 147}{100 \cdot 0,114 \cdot 7,85} = 18,3 \text{ м/ч}$$

2. Соединения стрингеров со шпангоутами и поясами обшивки – швы №2 и №3: 18,8 м/ч.
3. Соединения стрингеров с поясами обшивки – шов №4: 12 м/ч.
4. Соединения шпангоутов с поясами обшивки – шов №5: 27,4 м/ч.
5. Соединения шпангоутов с поясами обшивки – шов №6: 18,6 м/ч.
6. Соединения киля с флорами – шов №7: 18,1 м/ч.
7. Соединение киля с днищем – шов №8: 12,6 м/ч.
8. Соединения листов поясов обшивки – швы №9 и №10: 23,2 м/ч.
9. Соединения листов пояса обшивки – шов №11: 12,6 м/ч.
10. Соединение ширстрека и бархоута – шов №12:

$$V_{св} = \frac{9,71 \cdot 102}{100 \cdot 0,042 \cdot 7,85} = 30 \text{ м/ч}$$

11. Соединение бархоута и скулового пояса – шов №13: 31 м/ч.
12. Соединение скулового пояса и шпунтового пояса – шов №14: внут-

¹ Площадь поперечного сечения для каждого сварного шва рассчитана в САПР КОМПАС-3D

ренний шов – 29 м/ч, внешний шов – 16 м/ч.

13. Соединение шпунтового пояса и днища – шов №15: 27,3 м/ч.

14. Соединение форштевня с поясами обшивки – шов №16: 29 м/ч.

15. Соединение транцевого шпангоута и поясов обшивки – шов №17:
10 м/ч.

16. Соединение транцевого шпангоута и поясов обшивки – шов №18:
15 м/ч.

4. Напряжение на дуге (U_d) для принятых диаметров электродной проволоки и силы сварочного тока:

$$U_d = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_э}} \cdot I_{св.} + 1 = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1,2}} \cdot 147 + 1 = 27,7 \approx 28 \text{ В}$$

$$U_d = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_э}} \cdot I_{св.} + 1 = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1}} \cdot 102 + 1 = 26 \text{ В}$$

5. Вылет электродной проволоки ($l_э$) жестко не контролируется и составляет от 8 до 15 мм. При увеличении силы сварочного тока вылет проволоки уменьшается.

6. Скорость подачи электродной проволоки ($V_{пр}$) для принятых диаметров и силы тока:

$$V_{пр} = \frac{4 \cdot a_n \cdot I_{св.}}{\pi \cdot d_э^2 \cdot \rho} = \frac{4 \cdot 11,14 \cdot 147}{3,1416 \cdot 1,2^2 \cdot 7,85} = 184 \text{ м/ч}$$

$$V_{пр} = \frac{4 \cdot a_n \cdot I_{св.}}{\pi \cdot d_э^2 \cdot \rho} = \frac{4 \cdot 9,71 \cdot 102}{3,1416 \cdot 1^2 \cdot 7,85} = 160 \text{ м/ч}$$

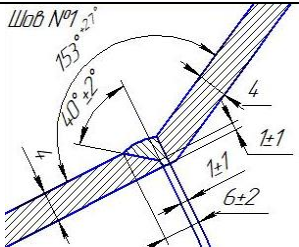
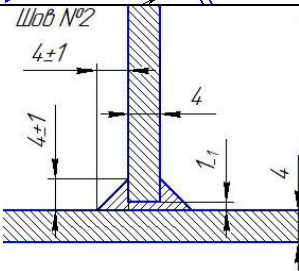
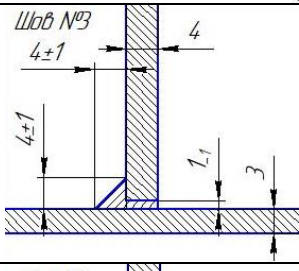
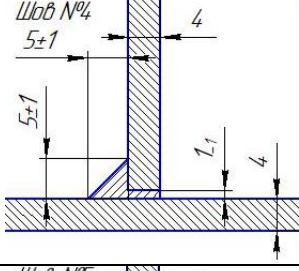
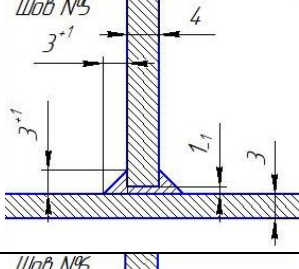
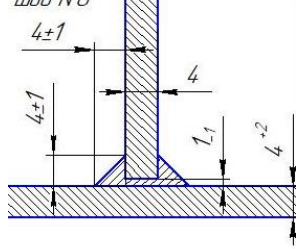
7. Определим ориентировочный расход CO_2 (q_r) по формуле:

$$q_r = 10 + \frac{I_{св.} - 30}{51,3} = 10 + \frac{147 - 30}{51,3} = 12 \text{ л/мин}$$

$$q_r = 10 + \frac{I_{св.} - 30}{51,3} = 10 + \frac{102 - 30}{51,3} = 11 \text{ л/мин}$$

8. Для повышения стабильности процесса сварки и уменьшения разбрызгивания металла используется постоянный ток обратной полярности (электрод как анод).

Таблица 6. Рассчитанные режимы сварки

№ шва	Параметры шва	$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$l_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м
1		1,2	147	18,3	28	8-15	184	12
2				18,8				
3				18,8				
4				12				
5				27,4				
6				18,6				

7				18,1				
8				12,6				
9		1,2	147	23,2	28		184	12
10				23,2		8-15		
11				12,6				
12				30				
13		1	102	31	26		160	11

14 ВНЕШН.	Шоб №14 	1	102	16	26	8-15	160	11
14 ВНУТР.				29				
15	Шоб №15 	1,2	147	27,3	28		184	12
16	Шоб №16 	1	102	29	26		160	11
17	Шоб №17 	1,2	147	10	28		184	12
18	Шоб №18 	1	102	15	26		160	11

3.2. Выбор сварочных материалов и расчет ожидаемых механических характеристик сварных соединений

Для сварки низколегированной стали 10ХСНД в среде защитных газов рекомендуется сварочная проволока марки Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70 [11, 38, 39, 40]. Химический состав данной проволоки представлен в таблице 7.

Таблица 7. Химический состав проволоки Св-08Г2С

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
0,05 – 0,11	0,7 – 0,95	1,8 – 2,1	До 0,25	До 0,025	До 0,03	До 0,2

В качестве защитного газа выберем смесь 82% Ar + 18% CO₂, изготавливаемую по ТУ 2114-001-87144354-2012 Ar/18CO₂ в баллонах. Такая смесь является наиболее рациональной для сварки спроектированного корпуса яхты и обладает рядом преимуществ по сравнению с однокомпонентным CO₂ 1-го сорта [41, 42]:

- повышенная стабильность сварочного процесса;
- пониженные потери электродного металла на разбрызгивание и как следствие увеличение количества наплавляемого металла за единицу времени;
- сниженное разбрызгивание позволяет сократить трудоемкость по удалению брызг;
- возможна работа в струйном режиме и в режиме мелкокапельного переноса;
- повышенные механические свойства сварного соединения, за счет улучшения микроструктуры металла сварного шва;
- уменьшение выделения вредных газов;
- уменьшение расхода электроэнергии и сварочной проволоки на 10-15%.

Для выбранной сварочной проволоки необходимо рассчитать ожидаемые химические и механические свойства металла сварного шва №15, так как данный шов является одним из наиболее ответственных в конструкции [36, 43]:

1. Определим долю участия основного металла в формировании шва:

$$\gamma = F_{\text{пр}} / (F_{\text{н}} + F_{\text{пр}}),$$

где площадь провара $F_{\text{пр}}$ определяется по формуле

$$F_{\text{пр}} = 0,095 \cdot (\eta_{\text{теп}} \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{св}}) / V_{\text{св}},$$

где $\eta_{\text{теп}}$ - полный тепловой КПД, равный для выбранной плотности тока 0,23.

Подставив значения получаем:

$$F_{\text{пр}} = 0,095 \cdot (0,23 \cdot 147 \cdot 28) / 27,3 = 3,29 \text{ мм}^2$$

$$\gamma = 3,29 / (7,82 + 3,29) = 0,3$$

2. Рассчитаем содержание химических элементов в металле шва по формуле и занесем данные в таблицу 9:

$$[\text{Э}] = (\gamma \cdot [\text{Э}]_{\text{осн}} + (1 - \gamma) \cdot [\text{Э}]_{\text{пр}}) \cdot \mu,$$

где γ — доля участия основного металла в формировании шва; μ — общий коэффициент усвоения элемента (таблица 8); $[\text{Э}]_{\text{осн}}$, $[\text{Э}]_{\text{пр}}$ — содержание химического элемента в основном металле, электродной проволоке, %;

Табл. 8. Общий коэффициент усвоения элемента в шов для низколегированной стали

С	Mn	Si	Cr	Ni
0,8	0,8	0,8	0,9	0,9

Подставив значения содержания¹ соответствующих химических элементов в основном металле 10ХСНД и сварочной проволоке Св-08Г2С, получаем:

$$[\text{C}] = (0,3 \cdot 0,06 + 0,7 \cdot 0,1) \cdot 0,8 = 0,07.$$

$$[\text{Mn}] = (0,3 \cdot 0,65 + 0,7 \cdot 0,9) \cdot 0,8 = 0,66.$$

¹ Для основного металла берутся средние значения содержания элементов, для электродной проволоки – немногим ниже предельного.

$$[\text{Si}] = (0,3 \cdot 0,95 + 0,7 \cdot 2) \cdot 0,8 = 1,35.$$

$$[\text{Cr}] = (0,3 \cdot 0,75 + 0,7 \cdot 0,2) \cdot 0,9 = 0,33.$$

$$[\text{Ni}] = (0,3 \cdot 0,65 + 0,7 \cdot 0,2) \cdot 0,9 = 0,30.$$

Таблица. 9. Химический состав основного металла (10ХСНД), сварочной проволоки (Св-08Г2С), сварного шва

Материал	Содержание элементов, %				
	С	Мn	Si	Cr	Ni
Основной металл	0,06	0,65	0,95	0,75	0,65
Электродная проволока	0,10	0,90	2,0	0,20	0,20
Металл шва	0,07	0,66	1,35	0,33	0,30

3. Произведем расчет ожидаемых механических свойств металла шва по приближённым формулам и занесем полученные данные в таблицу 10:

$$\sigma_B = 48 + 500 C + 252 \text{ Mn} + 175 \text{ Si} + 239 \text{ Cr} + 77 \text{ Ni} = 48 + 500 \cdot 0,07 + 252 \cdot 0,66 + 175 \cdot 1,35 + 239 \cdot 0,33 + 77 \cdot 0,30 = 564 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{0,2} = 0,73 \cdot \sigma_B = 0,73 \cdot 564 = 412 \text{ МПа};$$

$$\delta = 50,4 - (21,8 C + 15 \text{ Mn} + 4,9 \text{ Si} + 5,8 \text{ Cr} + 2,4 \text{ Ni}) = 50,4 - (21,8 \cdot 0,07 + 15 \cdot 0,66 + 4,9 \cdot 1,35 + 5,8 \cdot 0,33 + 2,4 \cdot 0,30) = 29\%.$$

Таблица 10. Механические свойства сварного соединения

Металл	Временное сопротивление разрушению, σ_B	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение, δ
	МПа	МПа	%
Основной металл	530	390	19
Металл шва	564	412	29

Результаты расчетов показали, что металл сварного шва, выполненного по предложенной технологии, имеет сопоставимые с основным металлом прочностные характеристики, а также обладает большим запасом пластичности и менее склонен к охрупчиванию. Расчетная прочность металла шва отличается от основного металла не более чем на 10%, таким образом, металл шва можно считать равнопрочным основному металлу. Послесварочная термообработка не требуется, так как шов обладает большей пластичностью, чем основной металл.

На основании вышеприведенного анализа можно сделать вывод, что рассчитанные режимы сварки и сварочные материалы выбраны правильно.

3.3. Выбор сварочного и вспомогательного оборудования

На основании рассчитанных режимов сварки, а также проведённого маркетингового анализа, представленного на рынке сварочного оборудования для частично механизированной сварки в среде защитных газов, выбран наиболее оптимальный инверторный сварочный полуавтомат AuroraPRO ULTIMATE 300 (Рис. 31). Технические характеристики данного аппарата представлены в таблице 11. AuroraPRO ULTIMATE 300 обладает следующими особенностями [44]:

- универсальный источник для полуавтоматической сварки MIG/MAG и ручной дуговой сварки MMA;
- лёгкий и компактный 4-роликовый механизм подачи проволоки с пакетом промежуточных кабелей 5м;
- передовая модульная технология IGBT;
- высокоэффективная технология воздушного охлаждения;
- двух- и четырехтактный режим работы;
- возможность подключения подогрева газа;
- аппарат прошел сертификацию НАКС;

Таблица 11. Технические характеристики AuroraPRO ULTIMATE 300

Параметр	Значение
Напряжение питающей сети	380 В
Потребляемая мощность	11 кВт
Напряжение холостого хода	56 В
Сварочный ток	50 - 300 А
Диаметр проволоки	0,8-1,2 мм
Скорость подачи проволоки	3 – 16 м/мин
Режим работы при 40°С	35% - 300 А / 100% - 250 А
Степень защиты	IP21
Габаритные размеры	49x23x43 см
Вес	25 кг



Рис. 31. Сварочный аппарат AuroraPRO ULTIMATE 300

В качестве вспомогательного оборудования для сборки и сварки, как всего корпуса яхты, так и отдельных его частей используется:

- сборочно-сварочный стол 3000x1500 мм;
- ручная цепная таль, грузоподъемностью до 3 тонн;
- оборудование для газовой сварки и резки;
- УШМ, кордщетка;
- угломер, линейка, рулетка, штангенциркуль, лазерный уровень;
- струбцины и магнитные угольники.

Для резки листов обшивки используется станок плазменной резки PCG-3000 с числовым программным управлением.

Сборка набора корпуса выполняется на специальном стапеле, собранном на рабочей площадке, он исполняет роль сборочно-сварочного приспособления на начальных и средних этапах изготовления корпуса яхты. Стапель изготавливается с малыми допусками, так как от качества его подготовки напрямую зависит качество сборки всего корпуса яхты. Чертеж разработанного стапеля представлен на рис. 32, 3D-модель представлена на рис. 33.

После сборки и сварки наружных швов корпус переворачивается «килем вниз» и устанавливается на кильблок, чертеж и модель которого представлены на рис. 34 и 35 соответственно.

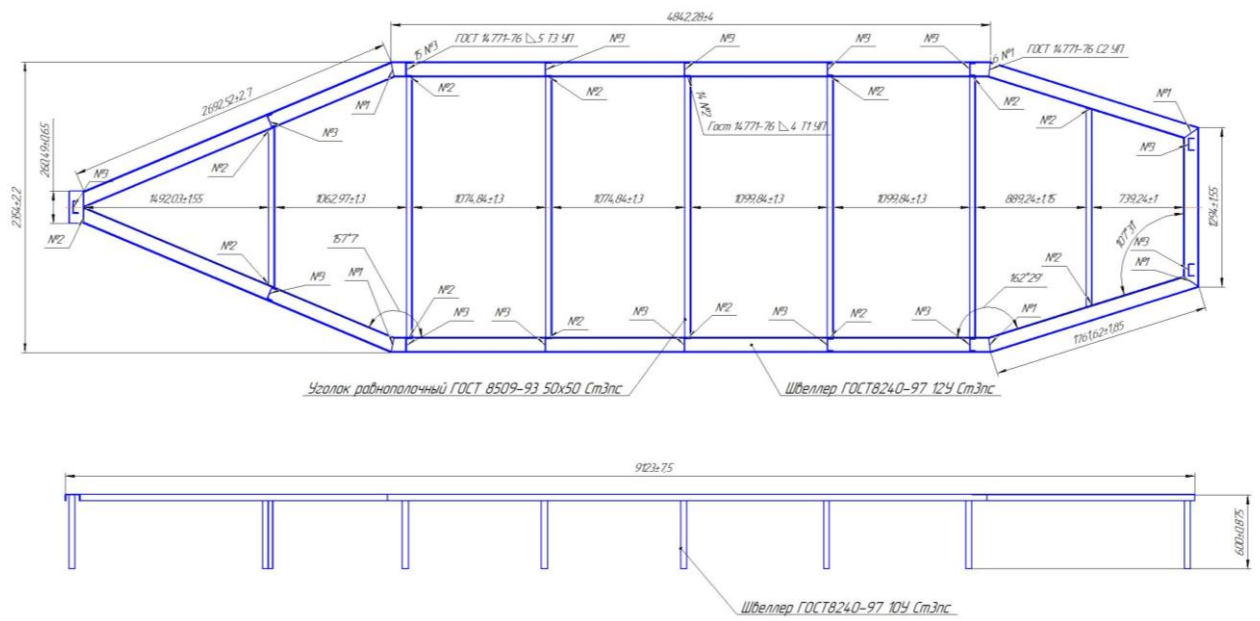


Рис. 32. Чертёж стапеля для сборки корпуса яхты

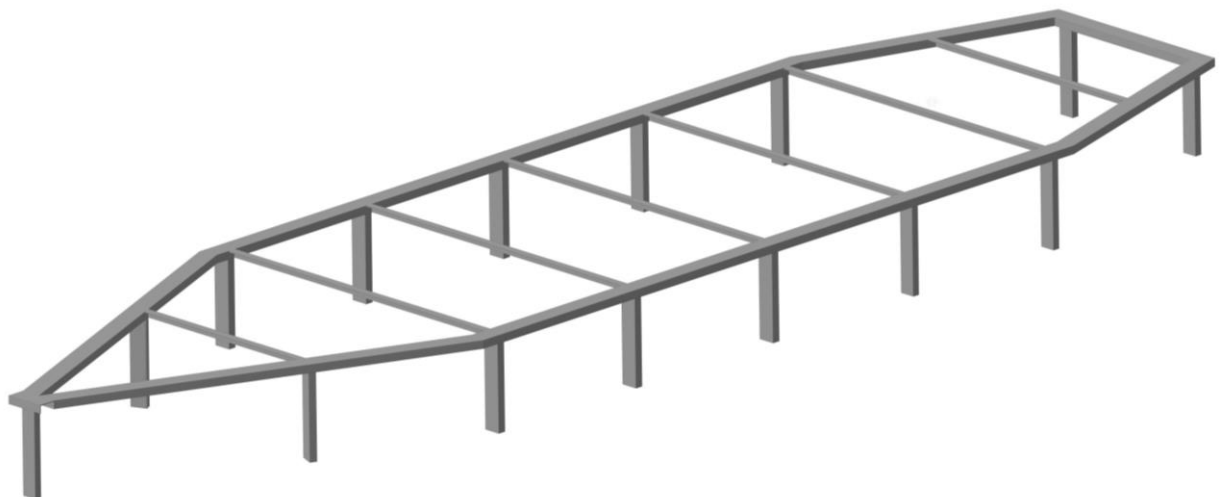


Рис. 33. Модель стапеля для сборки корпуса яхты

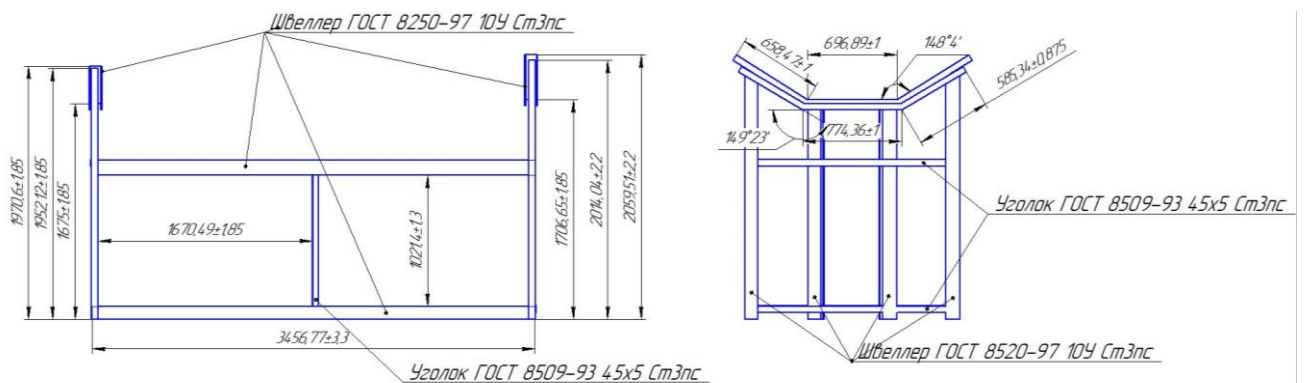


Рис. 34. Чертеж кильблока

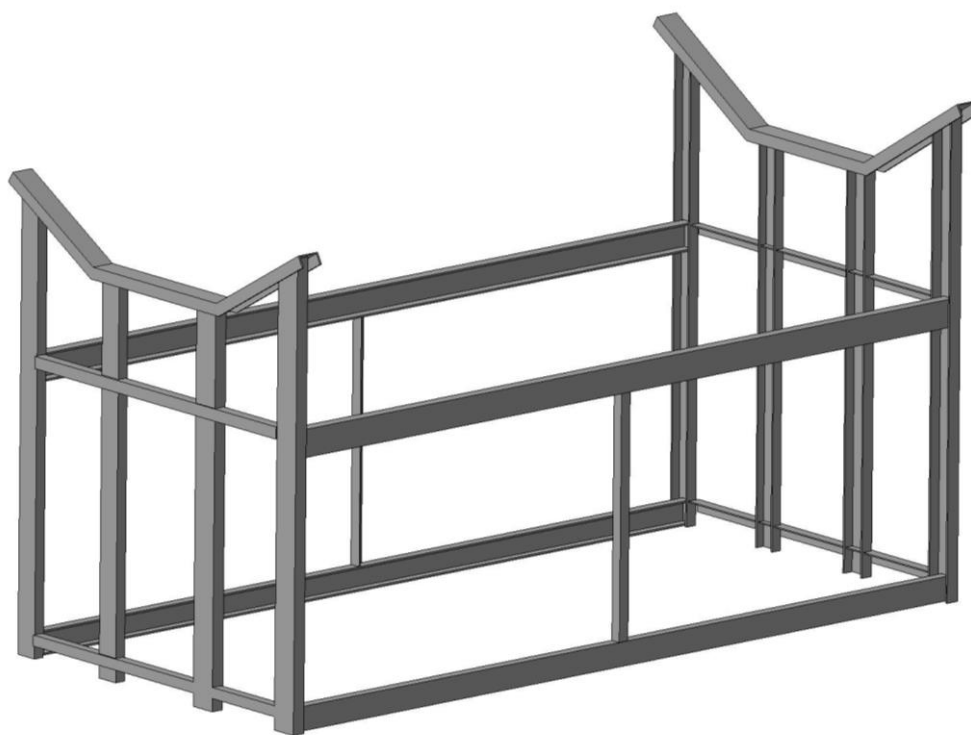


Рис.35. Модель кильблока

3.4. Моделирование процессов сварки корпуса судна

Моделирование процессов сварки проводится в программном комплексе ESI SYSWELD (Visual Mesh, Visual Weld, Visual Viewer, Weld Planner) который позволяет [45, 46]:

- создать модель сварного соединения и сетку конечных элементов;
- проанализировать и оценить металлургические (микроструктура шва), термические (тепловые поля) и механические (структурные напряжения) процессы в ходе сварки и термообработки проектируемой конструкции;
- получить общую картину распределения деформаций и напряжений, а также их величину;
- разработать и оптимизировать технологические параметры сварки: последовательность выполнения сварных швов, направление, способ, время сварки.

Анализ распределения деформаций и напряжений проведём для средней части корпуса, состоящей из двух шпангоутов (одна шпанция, 500 мм), двух стрингеров и двух поясов обшивки (бархоута и скулового пояса). В этой части корпуса (Рис. 36) сосредоточены основные типы сварных швов и ожидаются наибольшие деформации и напряжения.

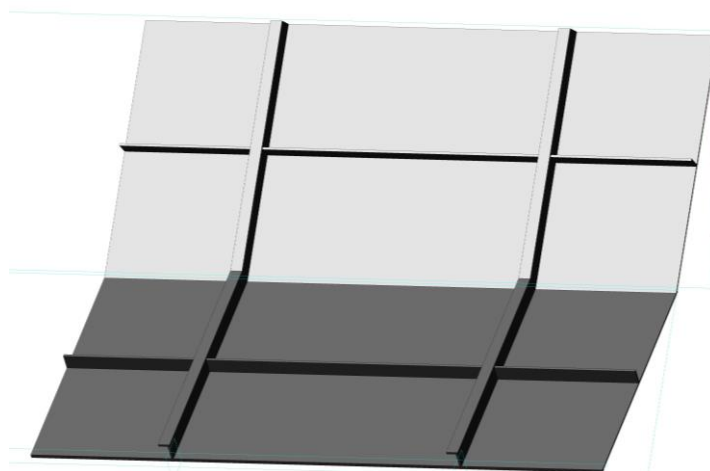


Рис. 36. Модель части корпуса для расчета на сварочные деформации и напряжения

Выбранная часть корпуса яхты разбита на отдельные сварные швы, в результате чего создана схема сварки, представленная на рис. 37.

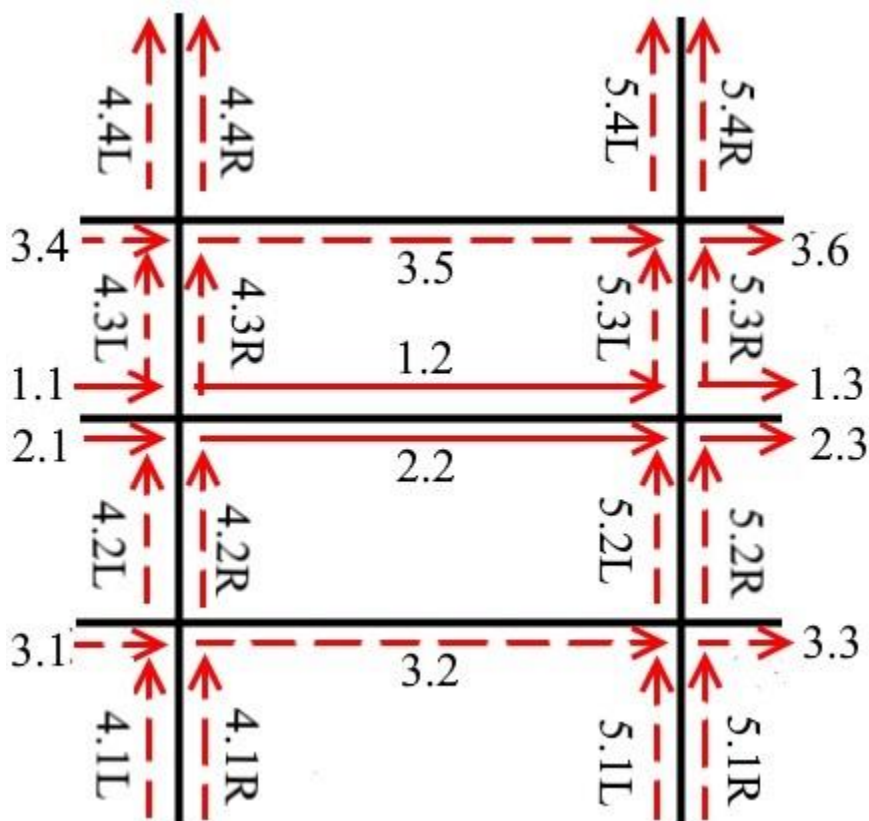


Рис. 37. Схема сварки части корпуса яхты

Для оптимизации технологических параметров сварки и уменьшения остаточных сварочных деформаций и напряжений в конструкции применяется метод прямого поиска [46, 47, 48, 49]:

1. Выбор определённого порядка выполнения сварных швов.
2. Ввод данных о порядке и направлении выполнения сварных швов в Weld Planner.
3. В Weld Planner производится расчет деформаций и напряжений в конструкции по заданным параметрам сварных швов.
4. Результаты расчета в виде полей распределения деформаций и напряжений визуализируются в Visual Viewer или Weld Planner.
5. Проводится анализ результатов.

Для реализации алгоритма расчета термических, механических и металлургических процессов сварки в программах Visual Weld и Weld Planner, необходимо создать сетку конечных элементов сварного соединения. Такая сетка (включающая сварные швы и крепления) для выбранной части корпуса яхты создана в программе Visual Mesh. Интерфейс данной программы и 2D сетка представлены на рис. 38.

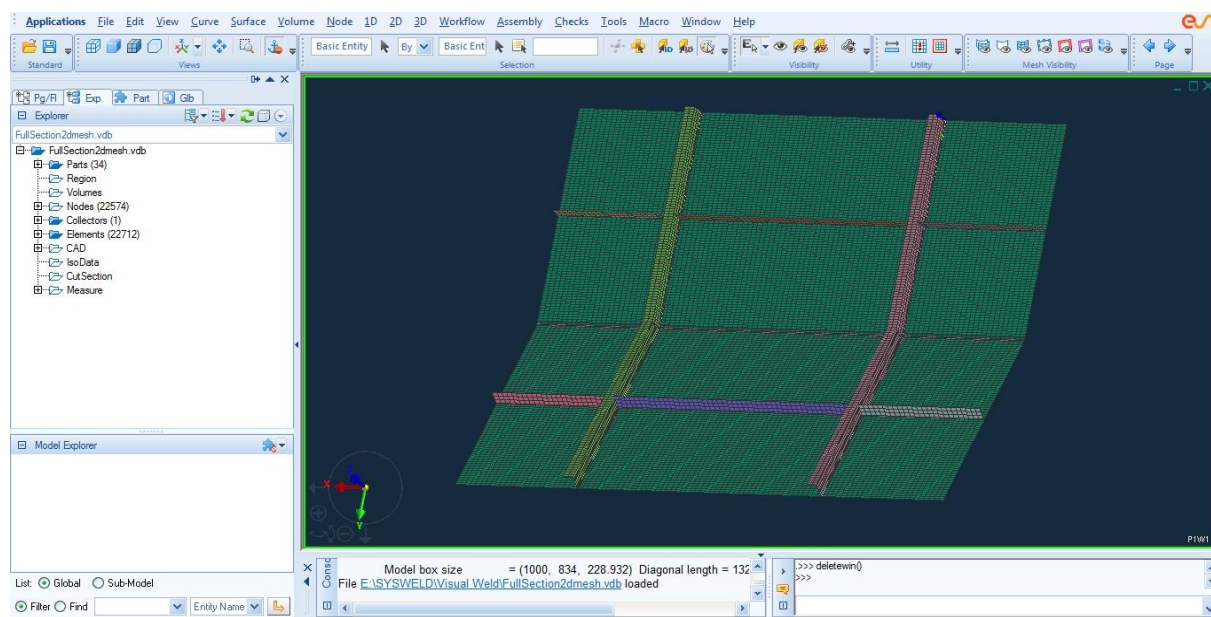


Рис. 38. Интерфейс программы Visual Mesh и 2D сетка конечных элементов для части корпуса яхты

Далее 2D сетка импортирована в программу Weld Planner (Рис. 39), где для дальнейших расчетов (экспериментов) задаются материал и толщина деталей, а также технологические параметры сварки (Рис. 40)

После ввода данных о порядке и направлении выполнения сварных швов в SYSWELD выполняется расчет деформаций и напряжений в узлах сетки конечных элементов (Рис. 41). Результаты расчета для каждого эксперимента приведены в таблице 12. На рис. 42-43 представлены поля деформаций для экспериментов №4 и №8 соответственно, визуализированные в Weld Planner. Поле напряжений для эксперимента №8 визуализировано в Visual Viewer и представлено на рис. 44-45.

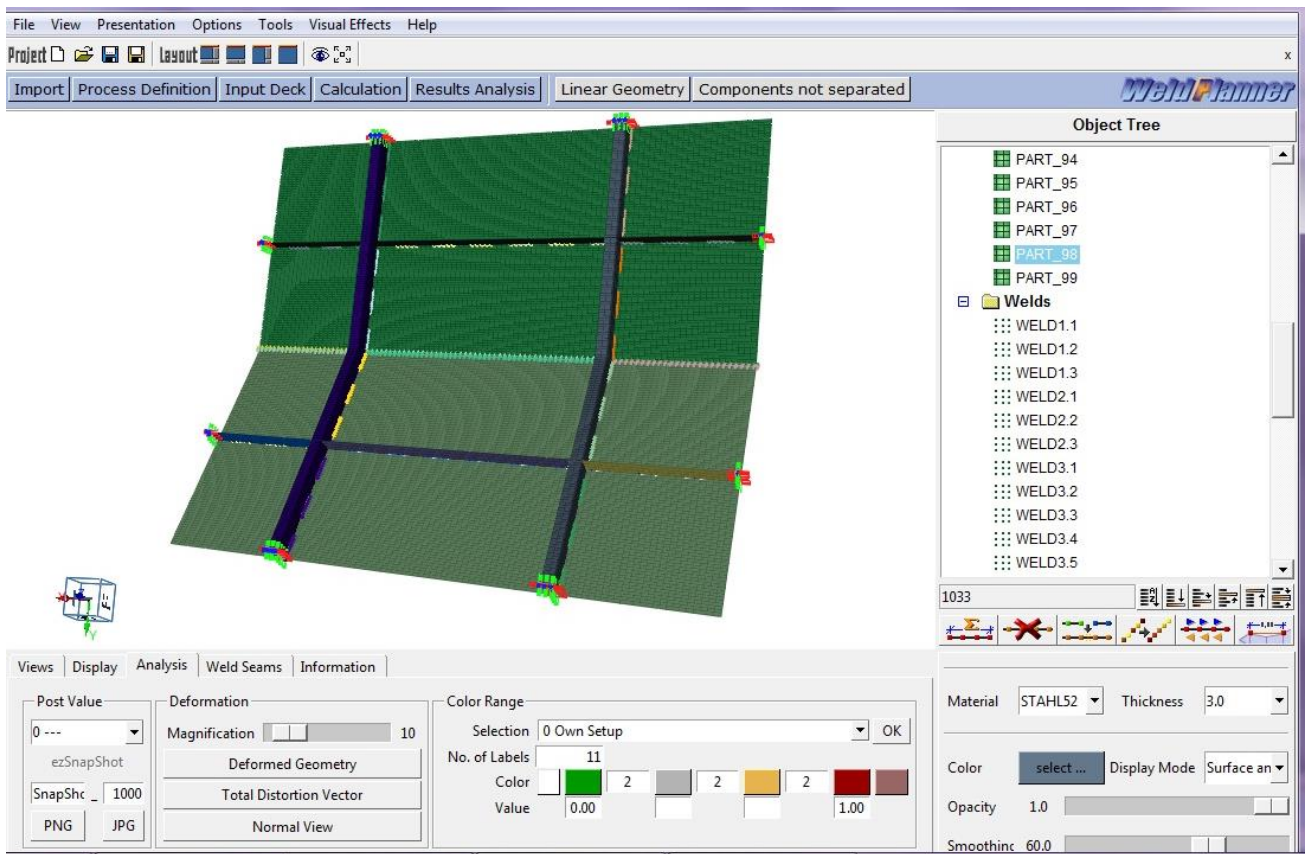


Рис. 39. Интерфейс Weld Planner и панель задания параметров детали и сварных

ШВОВ

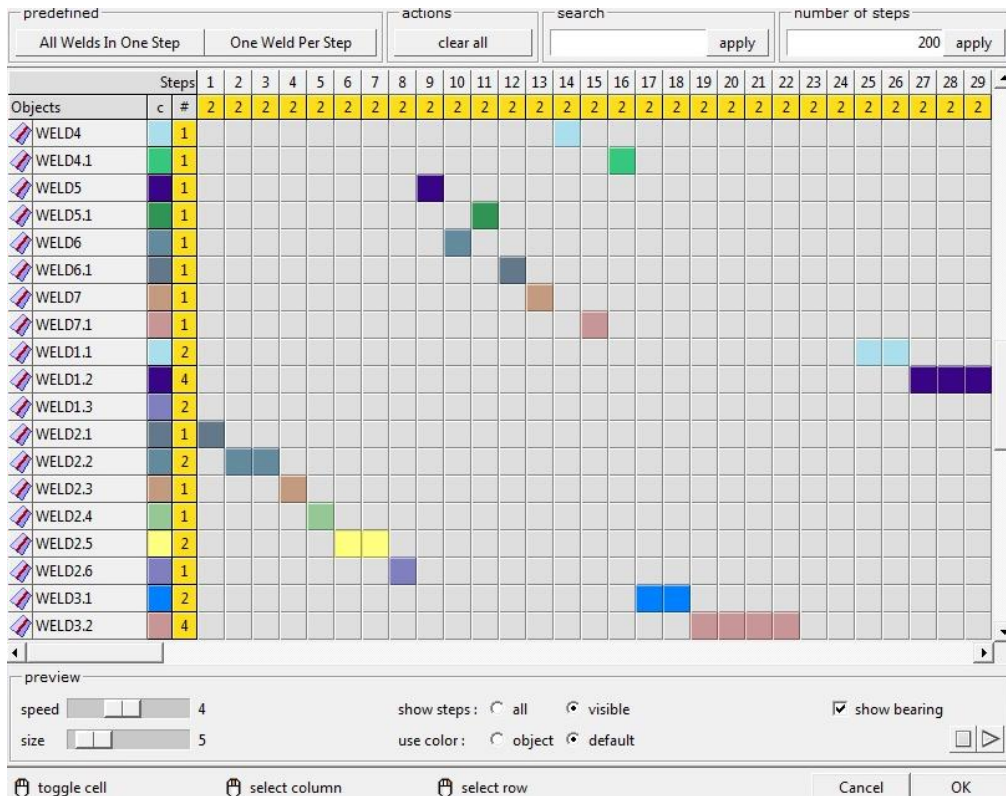


Рис. 40. Окно задания порядка выполнения сварки

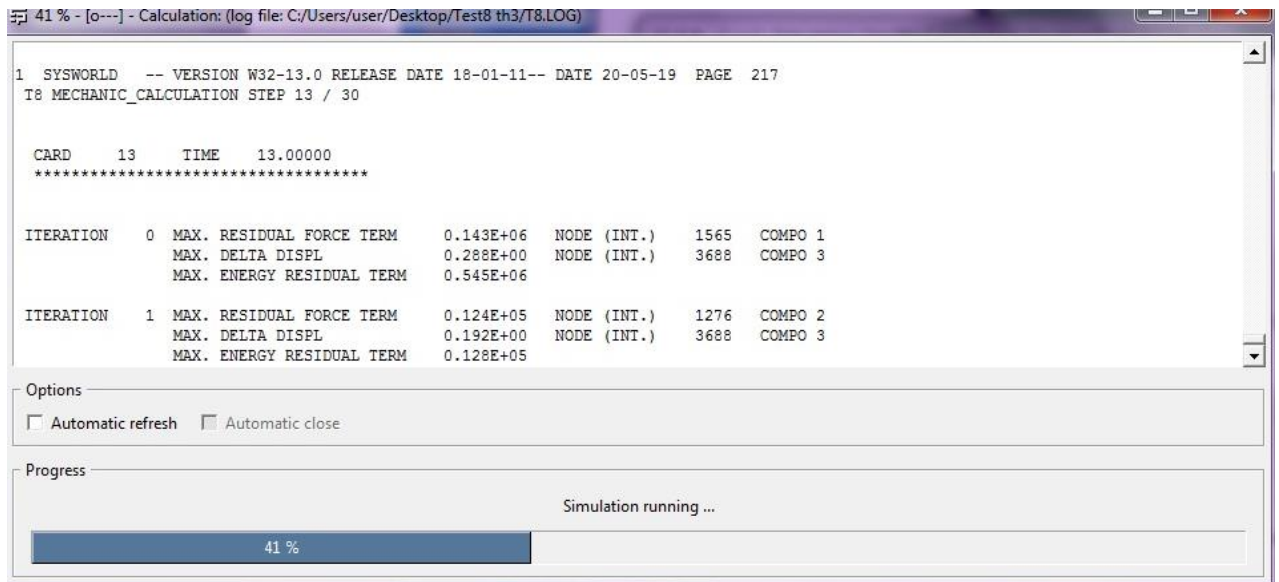


Рис. 41. Процесс расчета деформаций и напряжений конструкции в SYSWELD

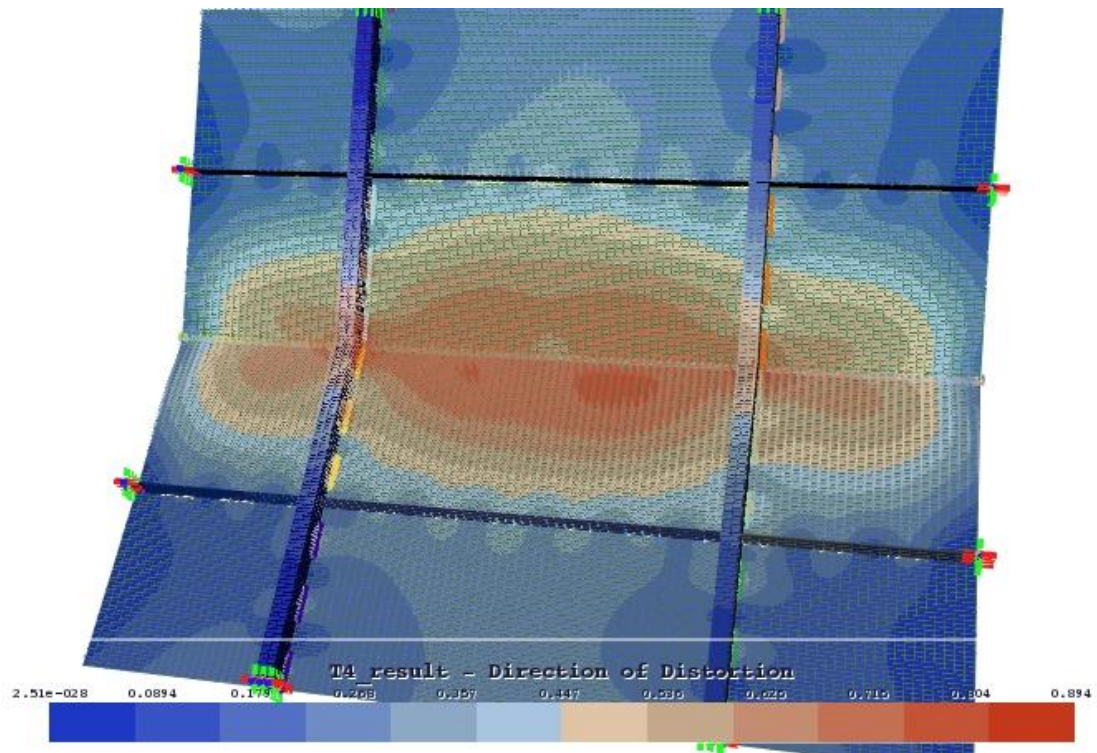


Рис. 42. Поле деформаций расчета №4

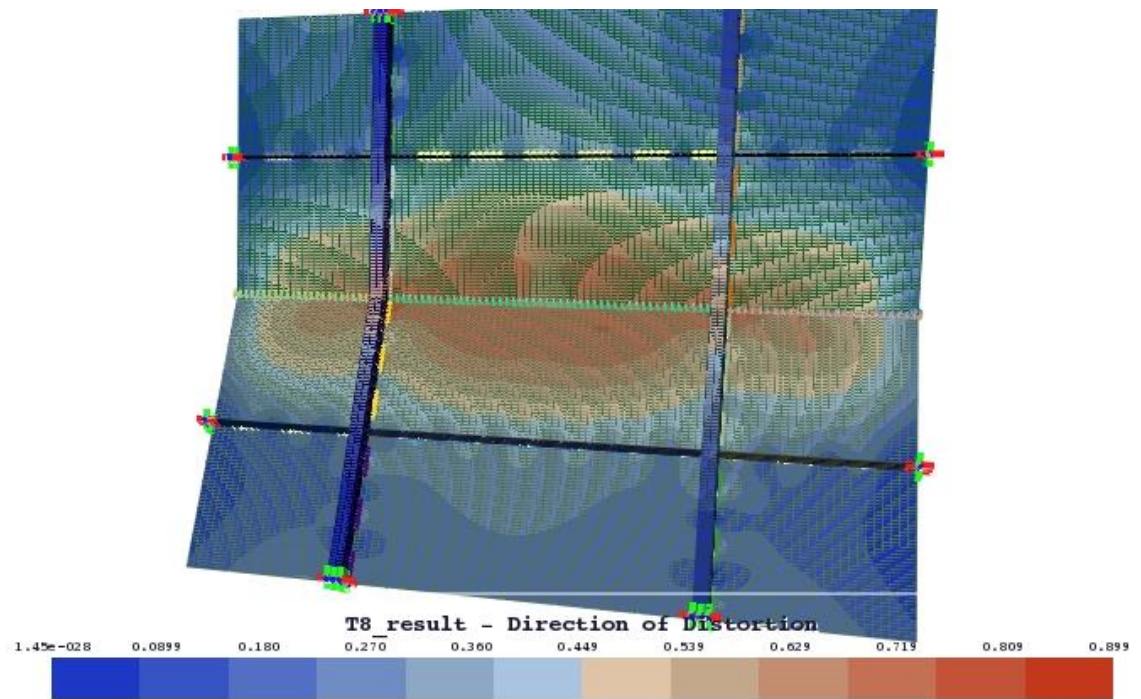


Рис. 43. Поле деформаций расчета №8

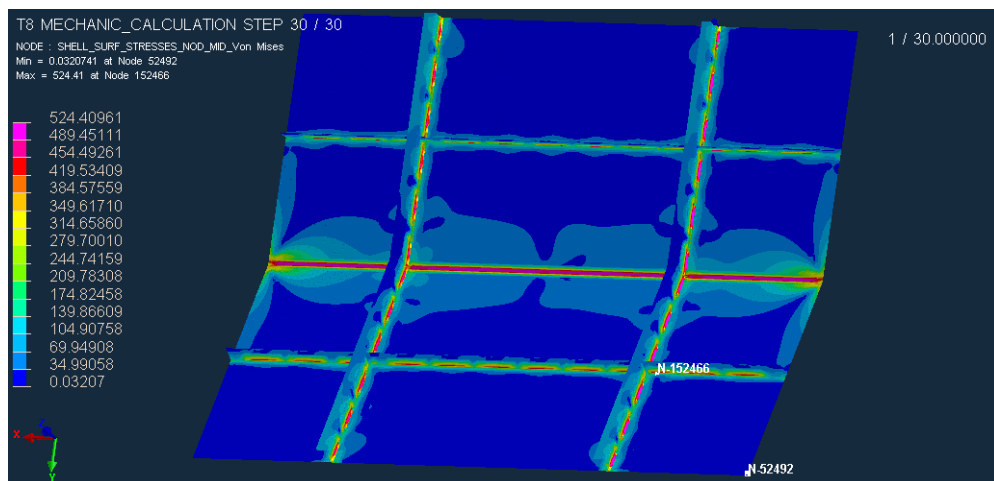


Рис. 44. Поле напряжений расчета №8

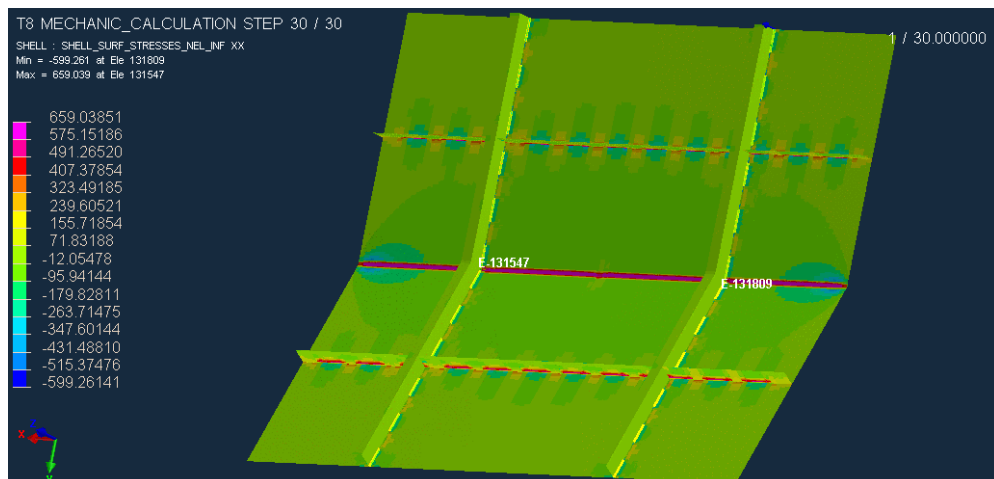


Рис. 45. Поле напряжений расчета №8 по оси X

Табл.12. Результаты моделирования процессов сварки

№ эксперимента	Порядок выполнения швов																										Максимальные деформации			
	1.1	1.2	1.3	2.3	2.2	2.1	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	4.1R	5.2L	4.3R	5.4L	5.1L	4.2L	5.3L	4.4R	4.1L	4.3L	4.2L	4.4L	5.1R	5.3R		5.2R	5.4R	
1	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	0,895	
2	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0,907
3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	0,896
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0,894
5	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,884
6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	0,904
7	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	0,946
8	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,899

Анализ результатов моделирования процесса сварки корпуса яхты в программе Weld Planner показал, что конструкция корпуса и выбранные режимы сварки обеспечивают минимальные деформации, при этом порядок выполнения сварных швов не существенно влияет на их величину. Выбираем наиболее оптимальный, с точки зрения технологии изготовления корпуса яхты, порядок наложения сварных швов согласно эксперименту №8.

Продольный сварной шов листов обшивки (шов №13) вызывает наибольшие деформации (по сравнению с остальными швами), поэтому для него применим обратноступенчатый способ сварки и проведем термический и механический расчет процесса сварки в программе Visual Weld:

1. Для сетки конечных элементов сварного соединения задаются точки начала и конца сварки (Рис. 46). Обратноступенчатый сварной шов разбивается на участки длиной 250 мм.
2. Задание характеристик свариваемой детали: материал - низколегированная сталь, толщина - 3 мм.

3. Установка параметров процесса сварки (Рис. 47):
 - Вид сварки: MAG.
 - Источник тепла: дуга.
 - Скорость сварки: 0,86 см/сек.
 - Время начала сварки.
 - Параметры сварочной ванны: длина 10 мм, ширина 4 мм, глубина 3 мм.
 - Погонная энергия: 2464 Дж/см.
4. Введение показателей охлаждения сварного соединения: охлаждение на открытом воздухе при температуре 20°C.
5. Установка закреплений.
6. Задание параметров расчета и создание файла входных данных.
7. Термо-металлургический и механический расчет процесса сварки в SYSWELD (Рис. 48).
8. Визуализация результатов термического и механического расчета в Visual Viewer в виде температурных полей (Рис. 49) и полей деформаций (Рис. 50).

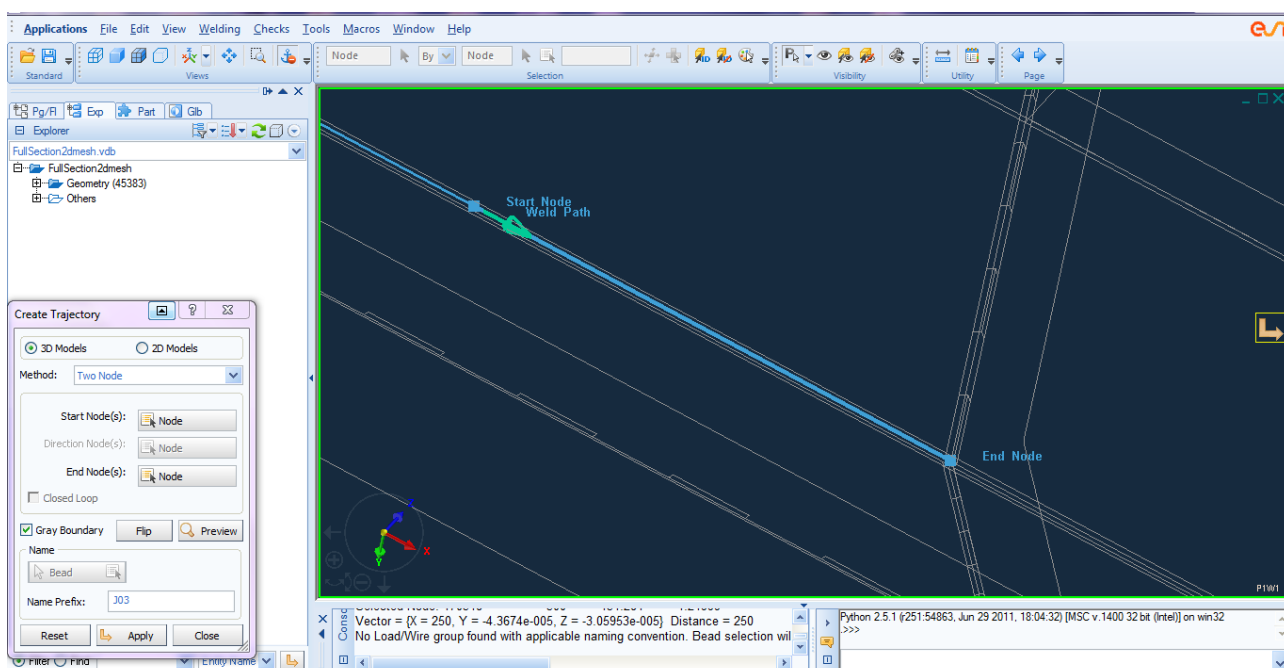


Рис. 46. Задание направления сварки

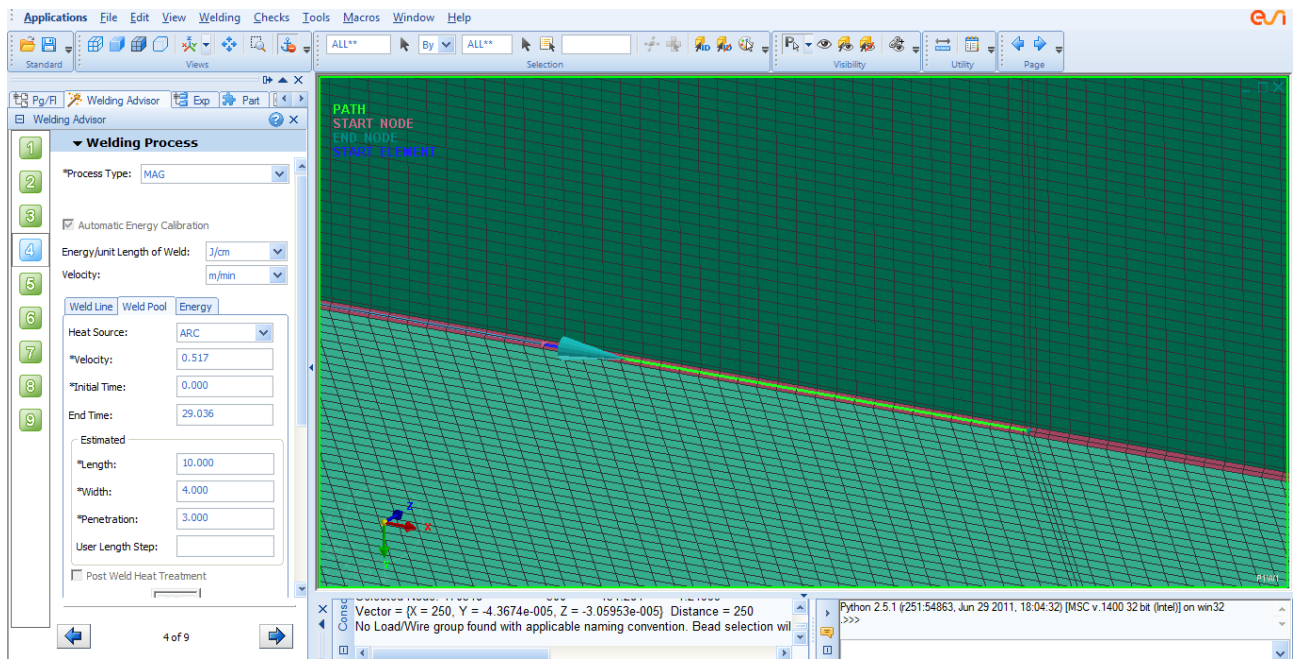


Рис. 47. Задание параметров процесса сварки

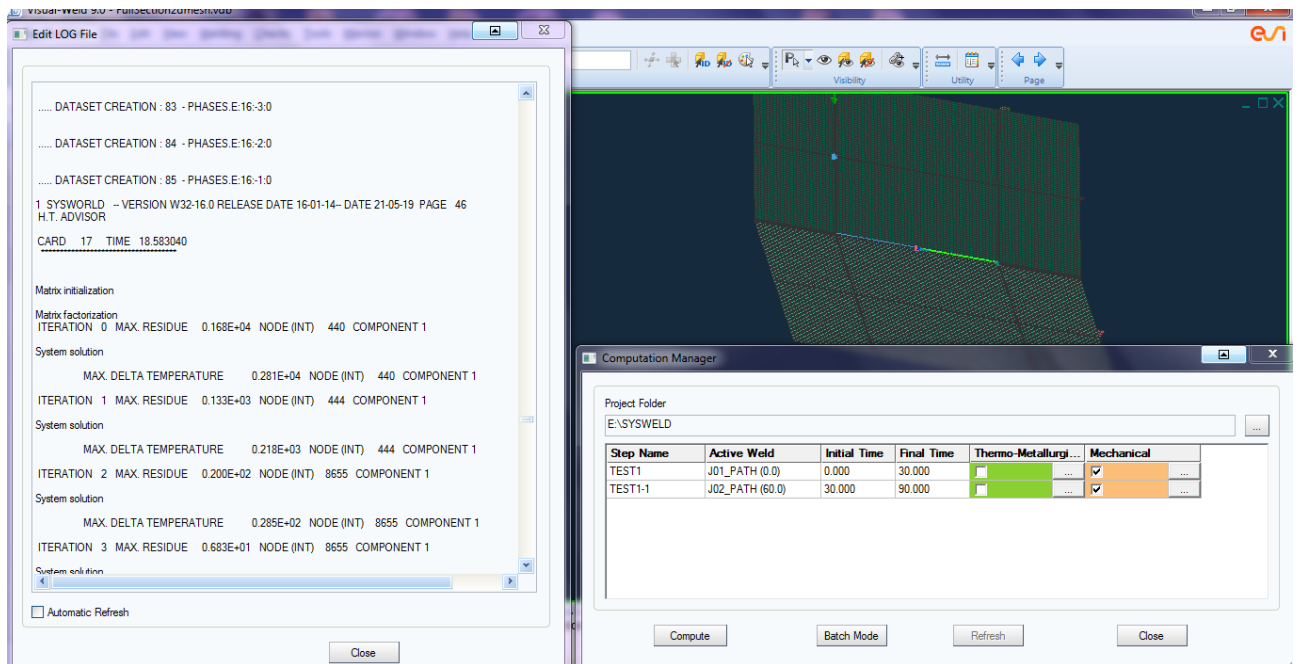


Рис. 48. Расчет процесса сварки

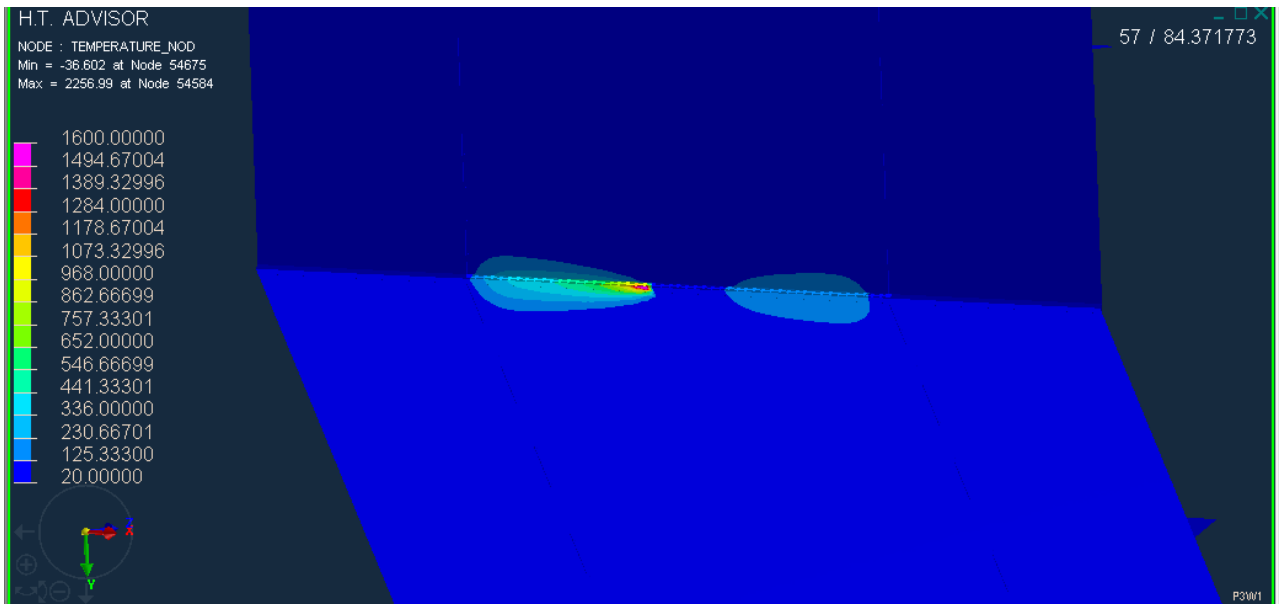


Рис. 49. Температурные поля процесса обратноступенчатой сварки обшивки корпуса яхты

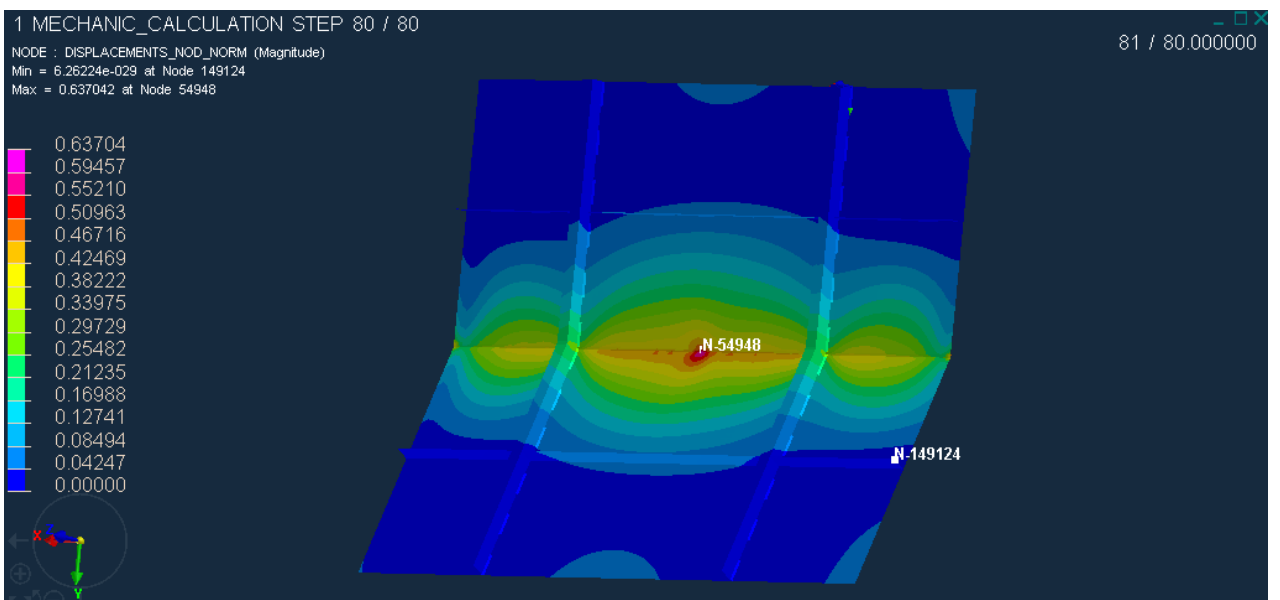


Рис. 50. Поля деформаций обратноступенчатой сварки обшивки корпуса яхты

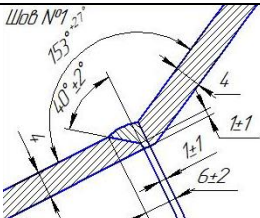
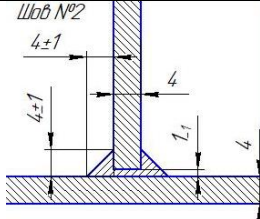
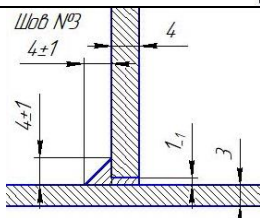
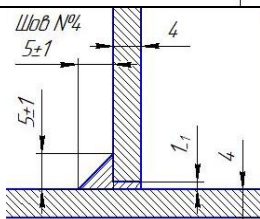
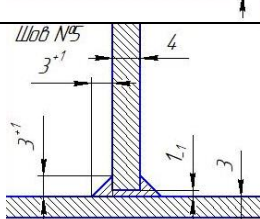
Результаты моделирования процесса обратноступенчатой сварки шва №13 показали, что максимальные деформации листов обшивки корпуса составляют 0,64 мм и, согласно требованиям Речного Регистра [28], являются незначительными. Это позволяет сделать вывод о правильности выбора способа и режима сварки.

3.5. Назначение методов и объёма контроля качества сварных соединений

Корпус парусной яхты является ответственной конструкцией и от качества выполнения сварных швов напрямую зависит безопасность эксплуатации яхты. В зависимости от степени ответственности для каждого типа сварного соединения конструкции применяются определённые виды контроля [50]. Наиболее оптимальными способами контроля качества сварных соединений корпуса яхты являются: визуально-измерительный контроль (ВИК) [51], капиллярная дефектоскопия (КД) и ультразвуковой контроль (УЗК) [52].

Данные о контроле качества сварных швов корпуса занесём в таблицу 13.

Таблица 13. Контроль качества сварных соединений корпуса яхты.

№ шва	Параметры шва	ВИК	КД	УЗК
1		+	-	-
2		+	-	-
3		+	-	-
4		+	-	-
5		+	-	-

6		+	-	-
7		+	-	-
8		+	-	-
9		+	+	-
10		+	+	-
11		+	-	+
12		+	+	-
13		+	+	-

14	<p>Шаб №14</p>	+	+	-
15	<p>Шаб №15</p>	+	-	+
16	<p>Шаб №16</p>	+	-	+
17	<p>Шаб №17</p>	+	-	+
18	<p>Шаб №18</p>	+	-	+
ИТОГО		100%	28%	28%

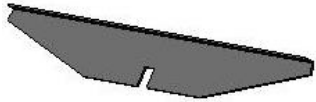
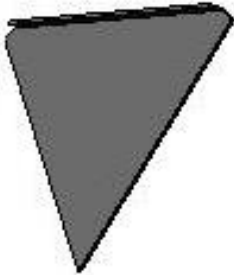
3.6. Технологический процесс сборки и сварки корпуса судна

На основании принятых параметров, а также рекомендаций специализированной литературы [3, 4, 5] разработан технологический процесс сборки и сварки корпуса яхты. Он состоит из двух основных этапов: сборка и сварка набора (таблица 14), сборка и сварка обшивки (таблица 15).

Кроме того, при изготовлении корпуса яхты необходимо придерживаться следующих особенностей [53]:

1. Сборка и сварка корпуса производится «килём вверх», так как технология существенно упрощается. Для этого готовится специальный стапель.
2. Сварка выполняется только после сборки конструкции на прихватках и полной проверки размеров корпуса и его симметрии.
3. Шпангоутные рамы и стрингеры изготавливаются заранее, перед сборкой набора корпуса.
4. Сборка набора корпуса начинается с мидельшпангоута. Затем поочередно добавляются шпангоуты носовой и кормовой частей судна. Между собой шпангоуты соединяются стрингерами.
5. После изготовления набора производится контроль размеров и вносятся возможные коррективы в раскрой листов обшивки.
6. При изготовлении корпусных деталей неизбежно возникают погрешности в размерах – поэтому необходимо применять метод взаимной подгонки деталей и постоянно контролировать симметрию строящегося корпуса.
7. Обшивка корпуса собирается на прихватки начиная с днища и, одновременно, с ширстрека. Последний пояс обшивки требует высокой точности подгонки.
8. Для предотвращения образования высоких внутренних напряжений и деформаций сварку производят в строгой технологической последовательности. Непрерывные сварные швы или превышение длины прерывистых швов недопустимы.

Таблица 14. Технологический процесс сборки и сварки набора корпуса яхты

№ п/п	Наименование операций	Эскизы																										
005	<p>Сборка и сварка флор:</p> <ul style="list-style-type: none"> – уложить на сборочный стол стенку и полку флора (см. эскизы 1-2). Зачистить и обезжирить все места под сварку на расстояние не менее 20 мм от края свариваемых кромок; – Собрать согласно чертежу. Для обеспечения перпендикулярности стенки и полки использовать магнитные угольники; – закрепить положение стенки и полки флора электроприхватками. Использовать следующие режимы для электроприхваток: <table border="1" data-bbox="336 1059 1195 1256"> <thead> <tr> <th>$d_{эл}$, мм</th> <th>$I_{св}$, А</th> <th>$U_{д}$, В</th> <th>$l_{э}$, мм</th> <th>$V_{пр}$, м/ч</th> <th>q_r, л/м</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,2</td> <td>160-180</td> <td>28-30</td> <td>8-15</td> <td>180- 200</td> <td>10-15</td> </tr> </tbody> </table> <p>магнитные угольники снять после установки электроприхваток;</p> <ul style="list-style-type: none"> – выполнить частично механизированную сварку в среде защитных газов по ГОСТ 14771 – 76 У4 ИП на режимах: <table border="1" data-bbox="336 1581 1195 1778"> <thead> <tr> <th>$d_{эл}$, мм</th> <th>$I_{св}$, А</th> <th>$V_{св}$, м/ч</th> <th>$U_{д}$, В</th> <th>$l_{э}$, мм</th> <th>$V_{пр}$, м/ч</th> <th>q_r, л/м</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,2</td> <td>140-150</td> <td>15-20</td> <td>27-28</td> <td>8-15</td> <td>175- 190</td> <td>10-15</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> – проверить сварной шов ВИК 100%; – проверить линейные размеры на соответствие чертежам. Допуск на линейный размер $\pm 0,5$ мм. 	$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м	1,2	160-180	28-30	8-15	180- 200	10-15	$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м	1,2	140-150	15-20	27-28	8-15	175- 190	10-15	 <p>Эскиз 1</p>  <p>Эскиз 2</p>
$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м																							
1,2	160-180	28-30	8-15	180- 200	10-15																							
$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м																						
1,2	140-150	15-20	27-28	8-15	175- 190	10-15																						

010

Сборка и сварка рам шпангоутов:

- уложить на сборочный стол части шпангоутной рамы: бимс, флор и тимберсы (см. эскизы 3-4). Собрать раму согласно чертежу. Для обеспечения плоскостности использовать магнитные угольники и струбцины. Зазоры в местах сварных соединений обеспечить при помощи упоров;
- зачистить и обезжирить все места под сварку на расстояние не менее 20 мм от края свариваемых кромок;
- закрепить положение частей шпангоута электроприхватками на режиме:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$l_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	160-180	28-30	8-15	180- 200	10-15

магнитные угольники, струбцины и упоры снять после установки электроприхваток;

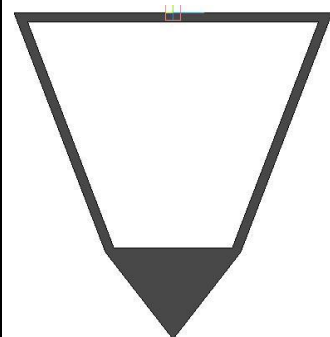
- проверить сборку на соответствие чертежам. Допуск $\pm 0,5$ мм;
- выполнить сварку в среде защитных газов соединений шпангоутной рамы (шов №1, нижнее положение сварки) на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	140-150	15-20	27-29	8-15	175- 190	10-15

- зачистить сварные швы от брызг, проверить по ВИК 100%;
- проверить размеры рамы. Допуск $\pm 0,5$ мм.



Эскиз 3



Эскиз 4

015

Сборка секций набора яхты:

- установить на центр стапеля мидельшпангоут «килём вверх» (см. эскиз 5). Положение шпангоутов закреплять строго перпендикулярно к стапелю, используя магнитные угольники и струбцины. Не допускается закреплять положение рам шпангоутов на стапеле электроприхватками. Для контроля перпендикулярности шпангоутов применять лазерный уровень. Допуск $\pm 0,5$ мм;
- установить следующий к носу судна шпангоут на расстоянии шпации (500 мм) согласно чертежу (см. эскиз 6);
- установить стрингеры ширстрека согласно чертежу, используя магнитные угольники, положение закрепить электроприхватками на режиме:

$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$U_{д},$ В	$l_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м
1,2	160-180	28-30	8-15	180- 200	10-15

магнитные угольники, струбцины, упоры шпангоутов и стрингеров снять после установки электроприхваток;

- проверить перпендикулярность шпангоутов и установку стрингеров на соответствие чертежам. Допуск $\pm 0,5$ мм;
- собрать стрингеры бархоута, скулового пояса и шпунтового пояса, закрепить положение электроприхватками (см. эскиз 6);



Эскиз 5



Эскиз 6

- проверить установку шпангоутов и стрингеров. Допуск $\pm 0,5$ мм;
- установить следующий к корме судна шпангоут на расстоянии шпации (500 мм) согласно чертежу;
- собрать стрингеры ширстрека, закрепить положение электроприхватками;
- собрать стрингеры бархоута, скулового пояса и шпунтового пояса, закрепить положение электроприхватками;
- проверить установку шпангоутов и стрингеров. Допуск $\pm 0,5$ мм;
- повторить предыдущие операции проводя поочерёдно сборку всех шпангоутов и стрингеров на электроприхватки согласно чертежу, кроме 2 носовых и транцевого шпангоутов (см. эскиз 7). Размеры контролируются угломером, лазерным уровнем, рулеткой после каждой сборки шпангоута со стрингерами. Допуск $\pm 0,5$ мм;
- собрать между собой части киля (неравнополочные уголки 40x20) до достижения заданной длины. Подготовить места сварки;
- выполнить сварку по ГОСТ 14771-76 С2 ИП частей киля. Режимы сварки:

$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$I_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м
1,2	140-150	15-20	27-29	8-15	175- 190	10-15

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%;

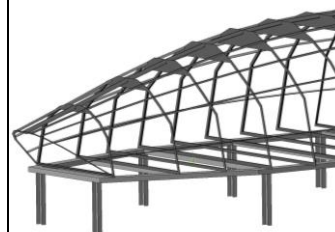


Эскиз 7

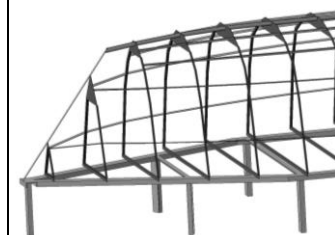
- установить киль во флоры шпангоутов (см. эскиз 8), закрепить положение электроприхватками;
- проверить установку киля на соответствие чертежу, допуск $\pm 0,5$ мм;
- собрать транцевый шпангоут и стрингеры на электроприхватки (см. эскиз 9). Проверить установку транцевого шпангоута на соответствие чертежу, допуск $\pm 1^\circ$;
- установить форштевень, положение закрепить электроприхватками, проверить установку, допуск $\pm 1^\circ$, ± 1 мм;
- собрать носовые шпангоуты на электроприхватки (см. эскиз 10), подготовить места под сварку;
- проверить сборку набора корпуса яхты на соответствие чертежу и симметрию при помощи угломера, линейки, рулетки, лазерного уровня.



Эскиз 8



Эскиз 9



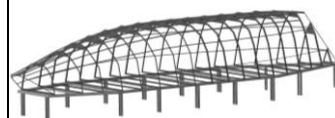
Эскиз 10

020 Сварка набора яхты:

- выполнить частично механизированную сварку в среде защитных газов соединений киля и флор (см. эскиз 11) (швы №7, потолочное положение сварки) на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$I_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_г$, л/м
1,2	145-155	16-22	27-29	8-15	175- 190	10-15

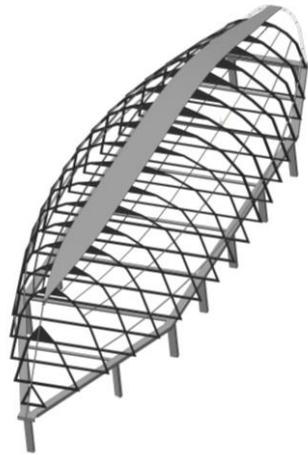
- проверить сварные швы по ВИК 100%;
- выполнить сварку соединений стрингеров и



Эскиз 11

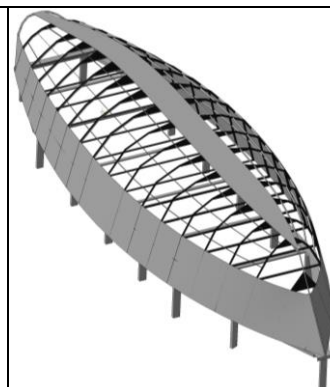
шпангоутов (шов №2, различные положения сварки) на режимах:						
$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	140-150	15-20	27-29	8-15	175- 190	10-15
<p>сварку осуществлять посекционно (выполняются все сварные швы каждой отдельной секции корпуса длиной в одну шпацию) от средней секции судна (мидельшпангоута) к носу и корме;</p> <p>– зачистить швы, проверить по ВИК 100%;</p>						

Таблица 15. Технологический процесс сборки и сварки обшивки корпуса яхты

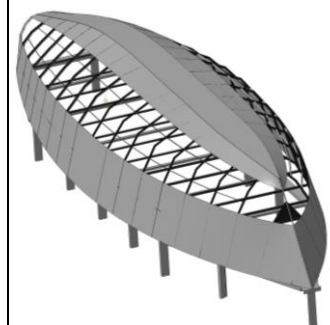
№ п/п	Наименование операций	Эскизы												
005	<p>Сборка поясов обшивки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – с помощью ручной цепной тали уложить носовой лист килевого пояса (днища) на набор корпуса согласно чертежу. – закрепить положение листа на шпангоутах электроприхватками. Использовать режимы: <table border="1"> <tr> <td>$d_{эл}$, мм</td> <td>$I_{св}$, А</td> <td>$U_{д}$, В</td> <td>$l_{э}$, мм</td> <td>$V_{пр}$, м/ч</td> <td>q_r, л/м</td> </tr> <tr> <td>1,2</td> <td>160-180</td> <td>28-30</td> <td>8-15</td> <td>180- 200</td> <td>10-15</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> – проверить сборку носового листа днища с набором на соответствие чертежу. Допуск ± 1 мм; – уложить кормовой лист килевого пояса на набор корпуса (см. эскиз 12). При необходимости применить термическую и термо- 	$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м	1,2	160-180	28-30	8-15	180- 200	10-15	 <p>Эскиз 12</p>
$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м									
1,2	160-180	28-30	8-15	180- 200	10-15									

механическую правку. Положение закрепить электроприхватками на шпангоутах и носовом листе. Проверить сборку на соответствие чертежу, допуск ± 1 мм;

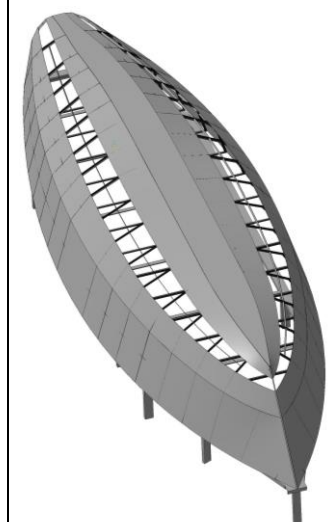
- установить носовые листы ширстрека на набор корпуса, положение закрепить электроприхватками на шпангоутах и форштевне. Проверить сборку на соответствие чертежу, допуск ± 1 мм;
- собрать последующие листы ширстрека на наборе от носа к корме судна (см. эскиз 13). Для создания зазоров в сварных соединениях листов ширстрека применить упоры. Положение закрепить электроприхватками на шпангоутах и форштевне. Проверить сборку ширстрека на соответствие чертежу, допуск ± 1 мм;
- последовательно установить листы шпунтового пояса на набор от носа к корме судна (см. эскиз 14), положение закрепить электроприхватками на шпангоутах форштевне и килевом поясе. Расстояние между прихватками на килевом поясе – 250 мм. Проверить сборку шпунтового пояса на соответствие чертежу, допуск ± 1 мм;
- собрать листы бархоута на наборе от носа к корме, положение закрепить электроприхватками на шпангоутах, форштевне и ширстреке (см. эскиз 15). Проверить сборку



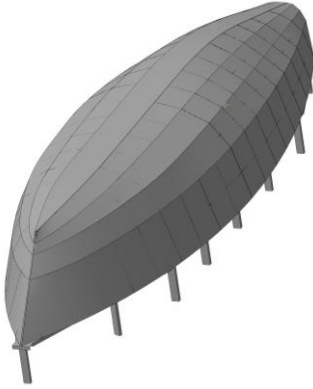
Эскиз 13



Эскиз 14



Эскиз 15

	<p>бархоута на соответствие чертежу, допуск ± 1 мм;</p> <ul style="list-style-type: none"> – установить листы скулового пояса на набор судна от носа к корме, положение закрепить электроприхватками (см. эскиз 16). Проверить сборку бархоута, допуск ± 1 мм; – проверить сборку обшивки корпуса яхты, допуск ± 1 мм. 	 <p style="text-align: center;">Эскиз 16</p>														
010	<p>Сварка наружных швов листов обшивки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – выполнить сварку соединений килевого и шпунтового поясов (шов №15, лицевая сторона) на режимах: <table border="1" data-bbox="341 931 1179 1126"> <thead> <tr> <th>$d_{эл},$ мм</th> <th>$I_{св},$ А</th> <th>$V_{св},$ м/ч</th> <th>$U_{д},$ В</th> <th>$I_{э},$ мм</th> <th>$V_{пр},$ м/ч</th> <th>$q_{г},$ л/м</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,2</td> <td>140-150</td> <td>25-30</td> <td>27-29</td> <td>8-15</td> <td>180-190</td> <td>10-15</td> </tr> </tbody> </table> <p>сварка обшивки корпуса производится обратноступенчатым способом от середины шва к краям, длина участков не более 250 мм. Перед выполнением сварки произвести подогрев деталей с помощью оборудования для газовой сварки до температуры 140°C. Определение температуры нагрева и контроль её постоянства производить инфракрасным пирометром;</p> <ul style="list-style-type: none"> – зачистить сварные швы от брызг; – проверить сварной шов по ВИК 100% и УЗК 100%; – выполнить сварку соединений скулового и шпунтового поясов (шов №14, лицевая сторона) на режимах: 	$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$I_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м	1,2	140-150	25-30	27-29	8-15	180-190	10-15	
$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$I_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м										
1,2	140-150	25-30	27-29	8-15	180-190	10-15										

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1	90-105	10-20	25-27	8-15	150-170	10-15

- зачистить, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку соединений скулового пояса и бархоута (шов №13, лицевая сторона) на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1	90-105	25-35	25-27	8-15	150-170	10-15

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку соединений ширстрека и бархоута (шов №12, лицевая сторона) на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1	90-105	25-35	25-27	8-15	150-170	10-15

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку соединений листов килевого пояса (шов №11, лицевая сторона) на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1,2	145-155	10-15	27-29	8-15	175-190	10-15

произвести предварительный подогрев деталей до температуры 140°C;

- зачистить сварные швы, проверить по ВИК 100% и УЗК 100%;
- выполнить сварку соединений листов шпунтового пояса (шов №10, лицевая сторона) на ре-

жимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$I_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1,2	145-155	20-25	27-29	8-15	175-190	10-15

- зачистить сварные швы, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку соединений листов скулового пояса, бархоута и ширстрека (шов №9, лицевая сторона) на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$I_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1,2	145-155	20-25	27-29	8-15	175-190	10-15

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку соединений поясов с форштевнем (шов №16) на режимах:


$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$I_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1	90-105	25-30	25-27	8-15	150-170	10-15

произвести предварительный подогрев деталей до температуры 140°C;

- зачистить сварные швы, проверить по ВИК 100% и УЗК 100%;
- выполнить сварку соединений листов обшивки и транцевого шпангоута (швы №17,18) на режимах: для шва №17

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$I_{э}$, мм	$V_{пр}$, м/ч	$q_{г}$, л/м
1,2	145-155	10-15	27-29	8-15	180-190	10-15

для шва №18

$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$l_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м															
1	90-105	15-20	25-26	8-15	150-170	10-15															
<p>выполнить предварительный подогрев деталей;</p> <p>– зачистить сварные швы, проверить по ВИК 100% и УЗК 100%;</p>																					
015	<p>Сварка внутренних швов обшивки:</p> <p>– перекантовать корпус яхты со стапеля и установить на кильблок (см. эскиз 17). Использовать ручные цепные тали. Разрешается приварка к бимсам, флорам, шпангоутам временных технологических скоб и пластин для облегчения перемещения корпуса;</p> <p>– выполнить сварку внутренних швов обшивки корпуса яхты в том же порядке и на тех же режимах, что и лицевые. Предварительный подогрев выполнять не требуется. Сварные швы проверить ВИК 100%. Швы №9, 10, 12, 13, 14 проверить КД 100%. Швы №11, 15 проверить УЗК 100%;</p> <p>– произвести сварку шпангоутов с поясами обшивки (швы №5,6) двусторонним прерывистым швом на режимах:</p> <p>для шва №5</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$d_{эл},$ мм</th> <th>$I_{св},$ А</th> <th>$V_{св},$ м/ч</th> <th>$U_{д},$ В</th> <th>$l_{э},$ мм</th> <th>$V_{пр},$ м/ч</th> <th>$q_{г},$ л/м</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,2</td> <td>145-155</td> <td>25-30</td> <td>27-29</td> <td>8-15</td> <td>180-190</td> <td>10-15</td> </tr> </tbody> </table> <p>для шва №6</p>						$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$l_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м	1,2	145-155	25-30	27-29	8-15	180-190	10-15	 <p>Эскиз 17</p>
$d_{эл},$ мм	$I_{св},$ А	$V_{св},$ м/ч	$U_{д},$ В	$l_{э},$ мм	$V_{пр},$ м/ч	$q_{г},$ л/м															
1,2	145-155	25-30	27-29	8-15	180-190	10-15															

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	145-155	15-20	27-29	8-15	180-190	10-15

длина участков 40 мм, шаг 80 мм. Сварку производить посекционно от мидельшпангоута к носу и корме судна;

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку киля и днища (шов №8) двусторонним прерывистым швом на режимах:

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	145-155	10-15	27-29	8-15	180-190	10-15

длина участков 40 мм, шаг 80 мм;

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%;
- выполнить сварку стрингеров и листов обшивки (шов №3,4) односторонним прерывистым швом на режимах:

для шва №3

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	145-155	15-20	27-29	8-15	180-190	10-15

для шва №4

$d_{эл}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$U_{д}$, В	$l_э$, мм	$V_{пр}$, м/ч	q_r , л/м
1,2	145-155	10-15	27-29	8-15	180-190	10-15

длина участков 40 мм, шаг 80 мм. Сварку производить поочередно для каждого пояса судна от мидельшпангоута к носу и корме;

- зачистить швы, проверить по ВИК 100%.

Выводы

В работе были выполнены следующие задачи:

1. На основании проведённого анализа существующих проектов стальных парусных яхт и применения стали в маломерном судостроении, установлены основные требования к конструкции парусных яхт из стали и рекомендации к их постройке, а также достоинства и недостатки стали как основного материала при строительстве парусных яхт. Кроме того, анализ позволил выделить основные параметры технического задания нового проекта яхты.
2. Разработано техническое задание, сформулированы требования к новому проекту судна и созданы его эскизы, на основании которых стало возможно создание теоретического чертежа будущего судна.
3. В программном комплексе Free!Ship построены теоретический чертёж и 3D модель корпуса яхты. Установлены оптимальные формы шпангоутов и обводы корпуса, обеспечивающие высокие ходовые характеристики, а также управляемость и остойчивость проектируемого судна.
4. Анализ применяемых в маломерном судостроении сталей позволил выбрать в качестве основного материала конструкции корпуса яхты сталь 10ХСНД. На основании комплексной оценки качества данной стали установлено, что она обладает удовлетворительной свариваемостью, не флокеночувствительна и имеет малую склонность к отпускной хрупкости, а также может свариваться любыми способами сварки.
5. На основании статистических и расчетных данных, а также рекомендаций специализированной литературы приняты основные параметры набора корпуса яхты: шпация, количество шпангоутов и скул, размеры и конструкция шпангоутных рам и стрингеров. Выполнена эскизная проработка набора. В результате сконструирован набор корпуса яхты и в САПР КОМПАС-3D создана его модель, а также

чертежи.

6. Согласно требованиям ГИМС для маломерных судов 1 класса, а также рекомендациям Морского Регистра и специализированной литературы, сконструирована обшивка корпуса яхты. В результате, в САПР КОМПАС-3D, созданы 3D модели листов обшивки, а также модель корпуса и общая модель проекта парусной яхты. В САПР Free!Ship выполнена развертка листов обшивки и их раскрой.
7. Выполненный в САПР КОМПАС-3D прочностной расчет конструкции показал, что сконструированный корпус яхты имеет достаточно высокую общую прочность, что говорит о правильности выбора материала конструкции, размеров связей набора, толщины обшивки и способа соединения поясов обшивки.
8. В соответствии с рекомендациями Морского Регистра и ГОСТ 14771-76 рассчитаны и приняты основные геометрические параметры сварных соединений конструкции корпуса яхты. Выбраны способы их выполнения.
9. На основании выполненного в программном комплексе Free!Ship расчета основных гидростатических и гидродинамических характеристик разработанного корпуса яхты, установлено, что яхта обладает высокими мореходными качествами и согласно требованиям ГИМС соответствует 1 классу.
10. Проведённый анализ применяемых в маломерном судостроении способов сварки позволил выбрать наиболее технологичный из них для изготовления корпуса яхты – частично механизированную сварку в среде защитных газов. Рассчитаны параметры режима сварки для каждого типа сварного соединения корпуса яхты.
11. Выбраны сварочные материалы и проведён расчет ожидаемых механических характеристик сварных соединений. Установлено, что металл сварного шва, выполненного по предложенной технологии, имеет сопоставимые с основным металлом прочностные характери-

стики и обладает бóльшим запасом пластичности и менее склонен к охрупчиванию.

12. На основании рассчитанных режимов сварки и маркетингового анализа, выбрано оптимальное сварочное и вспомогательное оборудование для изготовления яхты. Для обеспечения точности и упрощения сборки и сварки корпуса яхты разработаны специальные стапель и кильблок.
13. Математическое моделирование процесса сварки сложной, криволинейной конструкции стального корпуса парусной яхты с помощью программного обеспечения ESI SYSWELD позволило установить распределение деформаций и напряжений при сварке. Кроме того, обнаружена и экспериментально подтверждена возможность управления развитием сварочных деформаций и напряжений в сложных конструкциях маломерных судов за счёт применения рациональной технологии сборки и сварки, а также путём оптимизации способа и порядка выполнения сварных швов.
14. Для каждого сварного соединения конструкции корпуса яхты, в зависимости от степени ответственности, установлен метод контроля качества.
15. На основании принятых параметров проекта парусной яхты, а также рекомендаций специализированной литературы по проектированию маломерных судов, разработан подробный технологический процесс сборки и сварки корпуса яхты, который позволяет изготовить конструкцию с высокой точностью и минимальными сварочными деформациями.

Все поставленные в работе задачи были выполнены и максимально подробно рассмотрены, в связи с чем можно сделать вывод о высоком качестве разработанного проекта корпуса яхты и технологического процесса его изготовления, что свидетельствует о достижении поставленной цели.

Заключение

Разработана конструкция и технология изготовления стального корпуса парусной яхты для единичной и мелкосерийной постройки. Проект обладает следующими преимуществами:

- сравнительно высокие ходовые характеристики, согласно требованиям ГИМС судно соответствует 1 классу;
- принятые конструктивные решения, а также материал конструкции позволили уменьшить водоизмещение судна, не навредив другим качествам (мореходность, прочность, безопасность и др.), и упростить технологию его изготовления;
- материал и конструкция судна позволяют значительно снизить эксплуатационные затраты;

По разработанному проекту была изготовлена яхта «Ласточка», представленная на рис. 51. Проведенные ходовые испытания яхты показали, что судно безопасно для эксплуатации, полностью соответствует заданным техническим характеристикам, а также обладает высокими мореходными качествами по сравнению с другими яхтами своего класса.

Приведенный в работе алгоритм проектирования парусной яхты может быть рекомендован для разработки и оптимизации проектов стальных маломерных судов и технологии их изготовления.



Рис. 51. Яхта «Ласточка»

Список литературы

1. Технологии 3d в проектировании, реальность и перспективы / Зубова Л. Д. // Нефть. Газ. Новации. 2015. № 1. С. 31-38.
2. Прогнозирование качества изготовления деталей при технологическом проектировании / Цыганов В.С. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 2. С. 47-52.
3. Мордвинов Б. Г. Справочник по малотоннажному судостроению/ - Л: Судостроение, 1988. – 576с., ил.
4. Макаров М. И., Ветров В. М. Парусная азбука. – М.: Моркнига, 2008 – 268 с.
5. Рейнке К., Лютьен Л., Мус И. Постройка яхт 2-е изд., стереотипн.: Пер. с нем. – Л: Судостроение, 1986 – 368 с.
6. Проект Дикса Hout Bay 40 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chava.ru/hb40.html>. – (Дата обращения: 15.04.2019).
7. Курбатов Д. А. 15 проектов судов для любительской постройки – 3-е изд., перераб и доп. – Л.: Судостроение, 1985 – 416 с., ил.
8. Об утверждении временных правил классификации морских прогулочных судов, поднадзорных Государственной инспекции по маломерным судам Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [Электронный ресурс]: приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 29 июня 2005 г. № 497. – Режим доступа: http://www.gims.ru/zakon/zakon_20050629_MCCHS_497.html
9. Сталь марки 10XCHД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/10XSHD. – (Дата обращения: 29.04.2019).
- 10.ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.

11. Коломийцев Е. В. Коррозионная стойкость сварных соединений судокорпусных материалов // Автоматическая сварка. 2012. №4. с. 59-64.
12. D. Bai, T. Nelson, R. Bondar et al. Разработка на фирме «SSAB North America» сталей с высокими характеристиками для конструкции мостов // Новости чёрной металлургии за рубежом. 2010. №6. С. 67-70.
13. Ангал Р. Коррозия и защита от коррозии: учебное пособие: пер. с англ. / Р. Ангал. - Долгопрудный: Интеллект, 2013. -343с.
14. Лазуткина О. Р. Химическое сопротивление и защита от коррозии: учебное пособие / О. Р. Лазуткина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.
15. Икамацких Д.О. Роль термической обработки материала трубопроводов в улучшении их эксплуатационных свойств // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. ст. по мат. V междунар. студ. науч.-практ. конф. № 5. URL: <http://sibac.info/archive/technic/5.pdf> (дата обращения: 22.04.2019)
16. Аргунова А. А. Структурные изменения и механические свойства низколегированных сталей и их сварных соединений после термоциклической обработки // Диссертация ... канд. техн. наук. Якутск, 2000. 113 с.
17. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с яп, В. Н. Попова; Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с, ил.
18. Саранча С.Ю., Зайцев Д.А. Комплексная оценка качества конструкционных сталей // Качество в обработке материалов. 2015. №2. с. 54-58.
19. Классификация сталей по свариваемости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://oitsp.ru/welding_article/svarivaemost-metallov. – Оборудование и Технология сварочного производства – (Дата обращения: 30.04.2019)
20. Л.А. Ефименко, О.Ю. Елагина, Е.М. Вышемирский. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей // Сварочное производство. 2010. №5. с. 5-10.

21. Об утверждении временных правил классификации и технических требований к прогулочным и иным судам, поднадзорным ГИМС РФ [Электронный ресурс]: приказ главного управления Государственной инспекции по маломерным судам Российской Федерации от 28 июня 2001 г. №42. – Режим доступа:
<http://www.gimsyaroslavl.narod.ru/requirements.htm>.
22. Чижумов С. Д., Бурменский А. Д. Проектирование конструкций корпуса судна: Учебное пособие – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КНАГТУ», 2006. – 117 с.
23. Копельман, Л. А. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 154 с.
24. О безопасности маломерных судов [Электронный ресурс]: Технический регламент Таможенного союза 026/2012 от 15 июня 2012 г. №33. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293793/4293793541.htm>.
25. Белов Б.А., Иванова И.В. Разработка технологии изготовления килевой системы парусно-моторной яхты // Материалы МНТК «Неделя Науки». ИММИТ. – СПб: Изд-во СПбПУ, 2017. – С. 199–202.
26. Белов Б.А., Иванова И.В. Проектирование килевой системы парусно-моторной яхты // Материалы МНТК «Неделя Науки». ИММИТ. – СПб: Изд-во СПбПУ, 2017. – С. 196–199.
27. Белов Б.А., Иванова И.В., Калинина В.И. Опыт изготовления килевой системы парусно-моторной яхты // Юность и знания – гарантия успеха - 2017: Материалы МНТК. Курск: ЮЗГУ, 2017. С. 111–113.
28. Руководство Р.040-2013: Временное руководство по классификации и освидетельствованию маломерных судов. М.: Российский Речной Регистр, 2015. 70 с.
29. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / Ленинград: ЛКИ, 1980. — 331 с.
30. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения / М.: Машино-

- строение, 1968. - 236 с.
31. Байкова И. П. Основы теории сварочных деформаций и напряжений / Ленинград: ЛПИ, 1976. – 79 с.
32. Тимошенко В. Ф. Моделирование гидродинамики судов и подводных аппаратов с использованием комплекса flowvision и программы free!ship plus / Николаев: НУК, 2010. - 3 с.
33. Завьялов В.Е., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Технологические основы сварки плавлением. Учебное пособие. Изд-во СПбПУ, 2017. 224 с.
34. Завьялов В.Е., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Технология сварки плавлением. Учебное пособие. Второе изд., дополненное. Изд-во СПбПУ, 2019. 509 с.
35. Сироткин Ф.П. Расчет параметров режимов сварки: Методические указания по проведению практических занятий по дисциплине «Технология электрической сварки плавлением» - Н.Новгород: ВГИПУ, 2007. - 55 с.
36. Расчёт режимов технологического процесса при газозлектрической сварке [Текст]: учебно – методические указания к контрольной работы / сост. Н.Н. Подрезов; ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – 26 с.
37. Расчет основных параметров режима механизированной дуговой сварки плавящимся электродом: методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ Сост.: Р.Ф. Катаев. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 37 с.
38. Боровушкин, И. В. Сварка сталей в среде углекислого газа: Метод. рук. к практ. занятиям и лабор. работе / И. В. Боровушкин; Сыкт. лесн. ин-т. – Сыктывкар, 2004. – 32 с.
39. Автоматическая и полуавтоматическая сварка в защитных газах. Сварка в углекислом газе углеродистых и низколегированных конструкционных сталей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.prosvarky.ru/mehanizirov/automatweld/14.html>. – Про сварку-

- (Дата обращения 13.05.2019).
- 40.ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. М.: Изд. Стандартов, 2004. 20 с.
- 41.Крюков А.В., Павлов Н.В. газовые смеси, как способ совершенствования процессов сварки MIG/MAG // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; - Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15482> (дата обращения: 13.05.2019).
- 42.Газовые смеси и их использование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://domsvarki.ru/gazovye-smesi-i-ih-ispolzovanie/>. – Дом сварки – (Дата обращения: 14.05.2019).
- 43.Лебедев, Б. Д. Расчетные методы в сварке плавлением [Электронный ресурс] / Б. Д. Лебедев, В. В. Перемитько //studmed.ru/ -2014/ - Режим доступа: https://www.studmed.ru/lebedev-bd-peremitko-vv-raschetnye-metody-v-svarke-plavleniem_5cbe04652af.html (дата обращения 06.05.2019).
- 44.Инверторный сварочный полуавтомат AuroraPRO ULTIMATE 300 (MIG/MAG+MMA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://aurora-online.ru/catalog/welding/invertornie_poluavtomati/5161/. – (Дата обращения: 15.05.2019).
- 45.Определение рациональных режимов электродуговой сварки стали 30ХГСА с помощью конечно-элементного моделирования в программном комплексе SYSWELD / В.Ю Скиба, Е.Е. Корниенко, С.В. Веселов, Н.В. Плотникова // В сборнике: Современная металлургия начала нового тысячелетия. Сборник научных трудов VI международной научно-технической конференции. 2009. С. 238-245.
- 46.Анализ остаточных напряжений и деформаций после сварки конструкций, работающих под давлением, в программе SYSWELD / Биленко Г.А. // Металлург. 2012. № 8. С. 32-34.
- 47.Применение SYSWELD для исследования сварочных деформаций / Биленко Г. // САПР и графика. 2011. № 1 (171). С. 28-32.

48. Численное моделирование влияния различных параметров на минимизацию деформаций при сварке и наплавке тонких пластин / Хейдари М.А., Пантелеенко А.Ф. // В сборнике: Инновации в машиностроении Сборник трудов 2-ой Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. г. Кемерово, 2011. С. 295-296.
49. Георгий Биленко Моделирование процессов сварки при помощи продуктов ESI Group (SYSWELD, PAM-ASSEMBLY) // САПР и графика. – 2010. – №7. – С. 1 – 3.
50. Иванова И.В., Калинина В.И. Контроль качества сварных соединений. Часть 1. Качество. Дефект. Контроль неразрушающий. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2015. 67 с.
51. Иванова И.В., Калинина В.И., Паршин С.Г. Контроль качества сварных соединений. Часть 1. Визуальный контроль. Лабораторный практикум. Изд-во СПбПУ, 2015. 42 с.
52. Иванова И.В., Калинина В.И., Паршин С.Г. Контроль качества сварных соединений. Часть 2. Контроль неразрушающий. Лабораторный практикум. Изд-во СПбПУ, 2016. 70 с.
53. Белов Б.А., Иванова И.В. Разработка технологии изготовления сварного корпуса парусной яхты // Материалы МНТК «Неделя Науки». ИММИТ. СПб: Изд-во СПбПУ, 2018. С. 82–85.