

# СОДЕРЖАНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	9
<b>1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ .....</b>	<b>17</b>
1.1. Основы тепловых расчетов применительно к условиям сварки .....	24
1.2. Упрощенные инженерные расчетные схемы нагрева металла сварочными источниками тепла.....	31
1.3. Анализ ограничений и недостатков методов расчетов остаточных сварочных деформаций, регламентируемых РД 5.9807-93 .....	35
<b>2. МЕТОД РАСЧЕТА СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СТАТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ .....</b>	<b>43</b>
2.1. Обоснование эквивалентных сил и узловых нагрузок, вызванных продольными и поперечными укорочениями в сварных монтажных швах .....	44
2.2. Тестовые примеры расчета сварочных деформаций узлов корпусных конструкций .....	47
<b>3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО КОМПЕНСАЦИИ И СНИЖЕНИЮ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ .....</b>	<b>51</b>
3.1. Расчет остаточных деформаций полуобъемной секции днища.....	53
3.2. Расчетная оценка сварочных деформаций днищевого и палубного блоков корпуса крупнотоннажного судна .....	55
<i>Учет конструктивных особенностей блоков при построении КЭ моделей. Результаты расчетов остаточных сварочных деформаций блоков корпуса крупнотоннажного судна</i>	
3.3. Математическое моделирование остаточных сварочных деформаций корпуса танкера при постройке на стапеле .....	60
<i>Метод расчета сварочных деформаций при постройке корпуса танкера на стапеле. Результаты расчета сварочных деформаций корпуса танкера при постройке на стапеле. Оценка возможности компенсации сварочных деформаций</i>	

- 3.4. Расчетное обоснование с применением МКЭ технологии изготовления оболочечных конструкций корпуса для обеспечения минимальных сварочных деформаций ..... 71  
*Конструктивные узлы сварных соединений и режимы сварки. Оценка параметров укорочений в монтажных соединениях. Моделирование процесса сборки и сварки отсека корпуса. Результаты расчета сварочных деформаций. Технологические варианты 1 и 2. Технологические варианты 3 и 4*
- 3.5. Расчетное обоснование технологии установки и вварки толстостенных комингсов в торосферическую оболочку при обеспечении технологических допусков на линейные размеры и эллиптичность ..... 81  
*Моделирование сборки и сварки узлов пересечения торосферической и цилиндрических оболочек. Результаты расчетов остаточных деформаций при вварке комингсов в торосферическую оболочку*
- 3.6. Расчетная оценка сварочных деформаций при модернизации корпуса крупнотоннажного судна и обоснование технологических мероприятий по их снижению ..... 90  
*Математическое моделирование остаточных сварочных деформаций корпуса крупнотоннажного судна при замене секций в процессе его модернизации. Результаты расчетов остаточных сварочных деформаций корпуса крупнотоннажного судна. Разработка технологических мероприятий по их снижению. Расчетная оценка сварочных деформаций корпуса крупнотоннажного судна при сборочно-сварочных работах в кормовой оконечности*
- 3.7. Расчетная оценка с применением МКЭ остаточных деформаций и напряжений при изготовлении корпуса глубоководного аппарата ..... 101  
*Технология сборки и сварки корпуса глубоководного аппарата и расчетные КЭ модели. Результаты расчета сварочных деформаций и напряжений при изготовлении корпуса глубоководного аппарата*
- 3.8. Моделирование исправления общих деформаций корпуса танкера при капитальном ремонте с использованием технологических средств в условиях горизонтального стапеля .... 109  
*Разработка расчетной КЭ модели корпуса танкера с учетом остаточных деформаций конструкции и взаимодействия корпуса с горизонтальным стапелем. Моделирование исправления общих деформаций корпуса с применением технологических средств и определение основных параметров процесса. Анализ результатов расчета. Технология капитального ремонта и восстановления судов типа «река – море» секционным методом. Требования Правил Российского морского и Речного регистров к обеспечению прочности ремонтируемых судов ограниченного района плавания*
- Выводы ..... 126

<b>4. ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ЗАДАЧ РАСЧЕТА СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> .....	129
4.1. Основные цели расчета сварочных деформаций конструкций с применением МКЭ и решения термопластической задачи.....	129
4.2. Основные предпосылки разработки процедуры расчета сварочных деформаций и напряжений с применением МКЭ и термопластических решений .....	130
4.3. Применение МКЭ для расчета температурных полей при сварке .....	133
4.4. Основные уравнения нестационарной теплопроводности с применением МКЭ .....	139
4.5. Решение деформационной задачи с применением МКЭ.....	141
Выводы.....	146
<b>5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕШЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ</b> .....	147
5.1. Расчет НДС тавровой балки при автоматической сварке под слоем флюса .....	147
<i>Оценка влияния закреплений от вертикальных перемещений на НДС балки. Оценка влияния механической обработки шва и ЗТВ на НДС балки. Оценка влияния высокотемпературного отпуска на НДС балки</i>	
5.2. Решение термопластической задачи для бортовой секции .....	163
<i>Расчет температурных полей. Расчет остаточных напряжений и деформаций при сварке бортовой секции. Результаты расчета для 1-го варианта граничных условий. Результаты расчета для 2-го варианта граничных условий</i>	
5.3. Решение термопластической задачи для опытного образца, изготовленного с применением сварки в среде углекислого газа .....	173
5.4. Расчетное и экспериментальное исследования деформаций и напряжений при автоматической сварке опытного образца по методу «поперечная горка».....	176
<i>Измерение температурных полей при сварке опытного образца. Результаты расчета температурных полей при сварке опытного образца. Результаты расчета остаточных деформаций и напряжений при сварке опытного образца по методу «поперечная горка»</i>	
5.5. Расчет остаточных сварочных деформаций обечайки резервуаров с использованием технологии автоматической сварки по методу «поперечная горка» .....	186
<i>Расчет остаточных деформаций цилиндрической обечайки толщиной <math>s = 16</math> мм при односторонней автоматической сварке.</i>	

*Расчет остаточных деформаций цилиндрической обечайки толщиной  $s = 30$  мм при односторонней автоматической сварке пазового шва. Сопоставление результатов расчетов остаточных деформаций при сварке пазовых швов обечаек (разделы 5.5.1, 5.5.2) с экспериментальными данными измерений деформаций обечаек турбинных водоводов. Расчет остаточных деформаций двух цилиндрических обечаек толщиной  $s = 16$  мм при односторонней автоматической сварке стыкового шва. Расчет остаточных деформаций двух цилиндрических обечаек толщиной  $s = 30$  мм при односторонней автоматической сварке стыкового шва. Сопоставление результатов расчетов поперечных укорочений в швах обечаек при применении технологии односторонней автоматической сварки с рекомендациями по РД 5.9807-93*

Выводы по разделу 5.5..... 207

5.6. Расчет остаточных сварочных деформаций и напряжений в сферической оболочке резервуара..... 211

*Обоснование расчетных КЭ моделей сферической оболочки толщиной  $s = 30$  мм. Расчет остаточных деформаций и напряжений сферической оболочки толщиной  $s = 30$  мм при автоматической сварке по методу «поперечная горка». Оценка остаточных деформаций и напряжений при сварке сферической оболочки резервуара с применением инженерного метода в статической постановке*

Выводы по разделу 5.6..... 217

5.7. О влиянии технологического фактора на НДС и прочность судовых корпусных конструкций..... 218

*Недостатки процедур расчета прочности судовых корпусных конструкций и необходимость нового подхода. Основные задачи при исследовании влияния технологического фактора. Расчетная КЭ модель для анализа сварочных напряжений и деформаций оребренной цилиндрической оболочки. Результаты расчета температурных полей при приварке кольцевых ребер к цилиндрической обшивке ( $\sigma_T = 300$  МПа). Расчет остаточных напряжений и деформаций при приварке кольцевых ребер к цилиндрической оболочке ( $\sigma_T = 300$  МПа). Анализ взаимодействия полей остаточных напряжений и испытательной нагрузки на внутреннюю поверхность оболочки  $p = 3,0$  МПа ( $\sigma_T = 300$  МПа). Оценка предельной нагрузки  $p_{пр}$  для оболочки при наличии остаточных напряжений после приварки кольцевых ребер. Оценка влияния технологического фактора на предельную нагрузку  $p_{пр}$  оребренной цилиндрической оболочки, изготовленной из высокопрочной стали ( $\sigma_T = 1000$  МПа)*

5.8. Анализ прочности палубной конструкции при действии силовой и тепловой нагрузок со стороны газовой струи ракетного двигателя..... 240

*КЭ модель палубной секции. Задание параметров материала для КЭ модели палубы. Задание внешней нагрузки и граничных условий. Результаты расчета прочности палубной секции при совместном действии экстремальных тепловой и силовой нагрузок*

Выводы по разделам 5.7, 5.8 ..... 249

5.9. Дальнейшее совершенствование методики расчета сварочных напряжений и деформаций с применением решения термопластической задачи.....	250
<b>6. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРИГОНОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА.....</b>	<b>253</b>
6.1. Виды погрешностей корпусных конструкций.....	254
6.2. Методика оценки объемов пригоночных работ.....	255
6.3. Погрешности, наблюдавшиеся при сборке монтажных соединений.....	262
6.4. Зависимость величин несовпадений связей от допусков на изготовление и установку секций (блоков).....	270
6.5. Оценка технологических мероприятий по снижению пригоночных работ при сборке монтажных соединений корпуса.....	274
6.6. Оценка влияния технологических мероприятий по снижению величин сварочных деформаций на величины несовпадений связей (объем пригоночных работ) в монтажных соединениях корпуса.....	281
Выводы по разделу 6.....	282
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>283</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Таблицы.....</b>	<b>289</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Алгоритм расчета прочности корпусных конструкций с учетом технологического фактора при использовании КЭ компьютерного пакета ANSYS (версия 11 и выше).....</b>	<b>305</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>319</b>