

# 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.<br/>Оценка влияния механической обработки шва и ЗТВ на НДС балки.<br/>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 однопроходной 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 однопроходной односторонней автоматической сварке стыкового шва. Расчет остаточных деформаций двух цилиндрических обечаек толщиной  $s = 30$  мм при однопроходной односторонней автоматической сварке стыкового шва. Сопоставление результатов расчетов поперечных укорочений в швах обечаек при применении технологии однопроходной 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> |