

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 629.12.002

В. В. Веселков,
д-р техн. наук, проф.;

М. А. Кобец,
асп.

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

PRINCIPLES OF REALIZATION AND DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF THE AUTOMATED MANUFACTURING OF HULL CONSTRUCTIONS

В статье обосновывается положение о том, что автоматизация изготовления корпусных конструкций с использованием современных роботов возможна только на основе реализации технологии их сборки из деталей без припусков и управления с соблюдением сварочных зазоров при сборке. В рамках создания технологии предлагается использовать новый подход к формированию электронной модели для аналитической детализации, основанный на топологическом изменении геометрии описанной в чертеже конструкции в объемах общих сварочных деформаций и привязки к формоопределяющим линиям параметров сварных швов. Исключение влияния погрешностей изготовления деталей обшивки с использованием холодной гибки в данной технологии осуществляется за счет полного перехода на сборку конструкций на «каркасе», а для повышения точности деталей судового набора предлагается заменять детали из профильного проката на эквивалентные им детали, вырезаемые из листа машиной термической резки с числовым программным управлением.

The article proves that automation of manufacturing of hull construction using modern robots is only possible through the implementation of technology for their assembly of parts without allowances and compliance management welding gaps during assembly. As part of its creation is offered a new approach to the formation of an electronic model for the analysis of detail based on the topological changes in the geometry of the structure described in the drawing volumes of general welding strains and bind to the lines, which refer to the shape parameters of the welds. Excluding the impact of errors in the manufacture of parts sheathing is manufactured using cold bending in this technology at the expense of a full transition to the assembly of structures on the “frame”, and to improve the accuracy of parts of the ship set is proposed to replace the parts section rolled on equivalent parts cut from the sheet with thermal cutting machine with computer numerical control.

Ключевые слова: корпусные конструкции, «точная деталь», «точная конструкция», «сборочная заготовка», «электронная модель судна», сварочные деформации, припуски, машинная термическая резка с числовым программным управлением, сборка на каркасе.

Key words: hull construction, «exact detail», «exact construction», «assembly blank», «electronic model of the ship», the welding deformation, allowances, thermal cutting machine with computer numerical control, assembly on the frame.

В НАСТОЯЩЕЕ время отечественное судостроение находится на стадии коренной перестройки. Руководителям многих предприятий приходится заниматься реализацией задач внедрения новых организационных и технических решений на основе реконструкции своих производственных мощностей как применительно к современным условиям, так и в расчете на перспективу. Одними из наиболее сложных с точки зрения уровня принимаемых инженерных решений в настоящее время являются технологии изготовления корпусных конструкций, так как именно они во многом определяют сроки и качество строительства судов. Имеющиеся отечествен-

ные научные положения в данной области не всегда способны дать однозначные ответы на вопросы, возникающие у руководителей заводов при проведении масштабной модернизации своих предприятий.

Основной разработчик научных решений, связанных с технологией строительства судов, – ОАО «ЦТСС», в вопросах корпусостроения в настоящее время занимается в основном отдельными направлениями развития технологий резки листового проката и гибки вырезанных заготовок из листа и практически не ведет работ, связанных с совершенствованием технологии сборки корпусных конструкций. В результате данные направления развития производства предприятия вынуждены решать на основе зарубежных и частично собственных разработок.

Сегодня за рубежом широко рекламируются возможности применения робототехники для изготовления корпусных конструкций (рис. 1). Предлагаются отдельные решения по автоматизации выполнения сборочных и сварочных операций при изготовлении как плоских, так и объемных секций. Однако данное оборудование достаточно дорогое, поэтому ориентироваться на его применение при проведении модернизации производства можно только в случае правильной оценки всех проблем, связанных с эффективностью его применения, и возможных перспектив дальнейшего долговременного развития созданной технологии сборки на основе применения этого оборудования.

Проанализировав особенности известных вариантов автоматизированных технологий изготовления корпусных конструкций, можно сделать вывод о том, что в основе их эффективного применения должны лежать возможности автоматизации подготовки управляющих программ для сварочных роботов на базе использования постоянно развивающихся CAD/CAM систем. Следовательно, предприятие должно использовать их у себя в рамках выполнения подготовки производства, а также реализации технологии сборки без припусков, которая предполагает новое отношение к определению понятий «точная деталь» и «точная конструкция».

а)



б)



Рис. 1. Использование роботов для изготовления корпусных металлоконструкций:

а — роботизированный стенд для изготовления плоских конструкций;

б — стенд для изготовления объемных секций с использованием сварочного робота

До начала использования машин термической резки (МТР) с числовым программным управлением (ЧПУ), вычислительной техники и информационных технологий в судостроении вообще не существовало понятий «точная деталь» и «точная конструкция». Понятие «точность» в корпусостроении вообще было весьма условным. То, что до эпохи информационных технологий фиксировалось в плазовом эскизе на деталь, а затем производилось, правильнее следовало бы называть *сборочной заготовкой* [1]. Погрешности детали формировались при выполнении измерений на плазовой разбивке, затем в процессе ее разметки на листе и далее в рамках технологии вырезки. Результирующая геометрия деталей могла отличаться от заданной в чертеже на 5–10 мм. Поэто-

му приближение формы собранной конструкции к теоретически необходимой осуществлялось за счет искусства назначения припусков на детали и технологии их удаления при сборке.

С появлением МТР с ЧПУ и CAD/CAM систем понятие «точность» стало употребляться чаще, но все равно не в том виде, как в машиностроении. Даже в случае замены плазовой разбивки на электронную модель судна (рис. 2) принцип определения формы деталей в рамках решения задачи аналитической детализовки практически не отличался от традиционного. Процесс расчетного определения формы любой детали сводился к описанию с помощью специализированного проблемно-ориентированного алгоритмического языка границ детали через ссылки на линии из состава электронной модели и других формоопределяющих линий, а также к описанию узловых точек их пересечения и т. д. [2]. Это позволило рассчитывать геометрию деталей с такой точностью, что если после вырезки на МТР с ЧПУ их сложить в единой системе координат (не выполняя сварки), они образовывали конструкцию, описанную в исходном чертеже. Однако после сварки в конструкции, собранной из таких деталей, возникают сварочные деформации, которые в большинстве случаев вызывают укорачивание всей конструкции и ее изгиб в продольном и поперечном направлениях. При этом их фактические значения часто выходят за границы допустимых требований к нормируемой геометрической точности изготовления корпусных конструкций.

С целью снижения объема сварочных деформаций на этапах проектирования судна используют комплекс специальных мероприятий по определению рациональных конструктивных решений и оптимальных параметров сварных соединений. В процессе технологической подготовки постройки судов для снижения объема сварочных деформаций в корпусных конструкциях в течение длительного времени создавались методы разработки оптимальной технологии выполнения сварных соединений и выбора рациональной последовательности их сборки. Сегодня для изготовления днищевых конструкций с настилом второго дна отраслевыми документами предлагается 12 типовых вариантов сборки и сварки на наружной обшивке и 11 вариантов на настиле второго дна, а для бортовых и плоскостных секций — четыре различных варианта технологии сборки. При этом каждый из предлагаемых вариантов обеспечивает различные объемы общих сварочных деформаций.

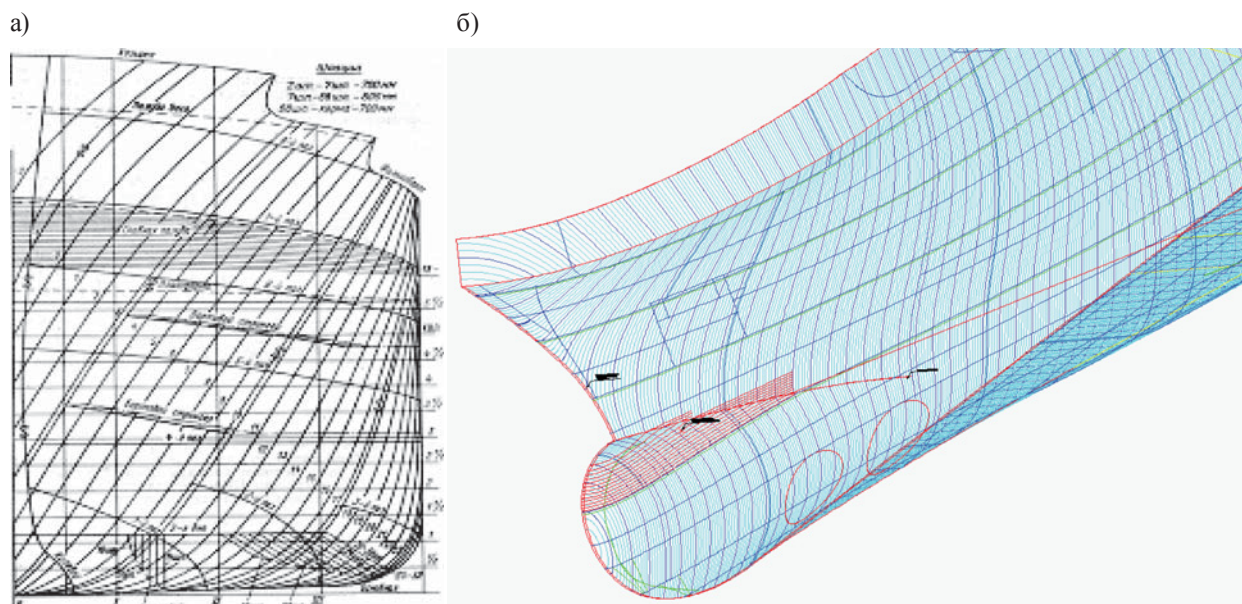


Рис. 2. Замена плазовой разбивки (а) на «электронную модель судна» (б)

Однако конструктивные решения, совместно с оптимизацией параметров сварки и выбором рациональной последовательности сборки секций, не устраняют сварочные деформации полностью, а лишь частично снижают их объем. Поэтому в процессе выполнения технологической подготовки постройки судна предприятиями-строителями разрабатываются специальные меропри-

В качестве основных для компенсации сварочных деформаций применяются два вида припусков: *линейные* (постоянные) — компенсация деформаций укорочения и *клиновые* — компенсация деформаций укорочения и изгиба (рис. 3).

номинальная геометрия детали
 клиновидный припуск
 линейный припуск
 объем остаточных сварочных деформаций
 форма лекал постели с учетом развала

Technical drawing of a ship's hull section showing internal structure, dimensions, and part numbers. The drawing includes a centerline (C.L.) and various dimensions and part numbers.

Dimensions and Part Numbers:

- Top horizontal dimension: 1934
- Left vertical dimension: 1257
- Top center part number: 1423
- Top center dimension: 6 mm Ø4
- Internal part numbers: 1220, 1221, 1222, 1223, 1224, 1225, 1226, 1227, 1228, 1229, 1230, 1231, 1232, 1233, 1234, 1235, 1236, 1237, 1238, 1239, 1240, 1241, 1242, 1243, 1244, 1245, 1246, 1247, 1248, 1249, 1250, 1251, 1252, 1253, 1254, 1255, 1256, 1257, 1258, 1259, 1260, 1261, 1262, 1263, 1264, 1265, 1266, 1267, 1268, 1269, 1270, 1271, 1272, 1273, 1274, 1275, 1276, 1277, 1278, 1279, 1280, 1281, 1282, 1283, 1284, 1285, 1286, 1287, 1288, 1289, 1290, 1291, 1292, 1293, 1294, 1295, 1296, 1297, 1298, 1299, 1300, 1301, 1302, 1303, 1304, 1305, 1306, 1307, 1308, 1309, 1310, 1311, 1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 1317, 1318, 1319, 1320, 1321, 1322, 1323, 1324, 1325, 1326, 1327, 1328, 1329, 1330, 1331, 1332, 1333, 1334, 1335, 1336, 1337, 1338, 1339, 1340, 1341, 1342, 1343, 1344, 1345, 1346, 1347, 1348, 1349, 1350, 1351, 1352, 1353, 1354, 1355, 1356, 1357, 1358, 1359, 1360, 1361, 1362, 1363, 1364, 1365, 1366, 1367, 1368, 1369, 1370, 1371, 1372, 1373, 1374, 1375, 1376, 1377, 1378, 1379, 1380, 1381, 1382, 1383, 1384, 1385, 1386, 1387, 1388, 1389, 1390, 1391, 1392, 1393, 1394, 1395, 1396, 1397, 1398, 1399, 1400, 1401, 1402, 1403, 1404, 1405, 1406, 1407, 1408, 1409, 1410, 1411, 1412, 1413, 1414, 1415, 1416, 1417, 1418, 1419, 1420, 1421, 1422, 1423, 1424, 1425, 1426, 1427, 1428, 1429, 1430, 1431, 1432, 1433, 1434, 1435, 1436, 1437, 1438, 1439, 1440, 1441, 1442, 1443, 1444, 1445, 1446, 1447, 1448, 1449, 1450, 1451, 1452, 1453, 1454, 1455, 1456, 1457, 1458, 1459, 1460, 1461, 1462, 1463, 1464, 1465, 1466, 1467, 1468, 1469, 1470, 1471, 1472, 1473, 1474, 1475, 1476, 1477, 1478, 1479, 1480, 1481, 1482, 1483, 1484, 1485, 1486, 1487, 1488, 1489, 1490, 1491, 1492, 1493, 1494, 1495, 1496, 1497, 1498, 1499, 1500, 1501, 1502, 1503, 1504, 1505, 1506, 1507, 1508, 1509, 1510, 1511, 1512, 1513, 1514, 1515, 1516, 1517, 1518, 1519, 1520, 1521, 1522, 1523, 1524, 1525, 1526, 1527, 1528, 1529, 1530, 1531, 1532, 1533, 1534, 1535, 1536, 1537, 1538, 1539, 1540, 1541, 1542, 1543, 1544, 1545, 1546, 1547, 1548, 1549, 1550, 1551, 1552, 1553, 1554, 1555, 1556, 1557, 1558, 1559, 1560, 1561, 1562, 1563, 1564, 1565, 1566, 1567, 1568, 1569, 1570, 1571, 1572, 1573, 1574, 1575, 1576, 1577, 1578, 1579, 1580, 1581, 1582, 1583, 1584, 1585, 1586, 1587, 1588, 1589, 1590, 1591, 1592, 1593, 1594, 1595, 1596, 1597, 1598, 1599, 1600, 1601, 1602, 1603, 1604, 1605, 1606, 1607, 1608, 1609, 1610, 1611, 1612, 1613, 1614, 1615, 1616, 1617, 1618, 1619, 1620, 1621, 1622, 1623, 1624, 1625, 1626, 1627, 1628, 1629, 1630, 1631, 1632, 1633, 1634, 1635, 1636, 1637, 1638, 1639, 1640, 1641, 1642, 1643, 1644, 1645, 1646, 1647, 1648, 1649, 1650, 1651, 1652, 1653, 1654, 1655, 1656, 1657, 1658, 1659, 1660, 1661, 1662, 1663, 1664, 1665, 1666, 1667, 1668, 1669, 1670, 1671, 1672, 1673, 1674, 1675, 1676, 1677, 1678, 1679, 1680, 1681, 1682, 1683, 1684, 1685, 1686, 1687, 1688, 1689, 1690, 1691, 1692, 1693, 1694, 1695, 1696, 1697, 1698, 1699, 1700, 1701, 1702, 1703, 1704, 1705, 1706, 1707, 1708, 1709, 1710, 1711, 1712, 1713, 1714, 1715, 1716, 1717, 1718, 1719, 1720, 1721, 1722, 1723, 1724, 1725, 1726, 1727, 1728, 1729, 1730, 1731, 1732, 1733, 1734, 1735, 1736, 1737, 1738, 1739, 1740, 1741, 1742, 1743, 1744, 1745, 1746, 1747, 1748, 1749, 1750, 1751, 1752, 1753, 1754, 1755, 1756, 1757, 1758, 1759, 1760, 1761, 1762, 1763, 1764, 1765, 1766, 1767, 1768, 1769, 1770, 1771, 1772, 1773, 1774, 1775, 1776, 1777, 1778, 1779, 1780, 1781, 1782, 1783, 1784, 1785, 1786, 1787, 1788, 1789, 1790, 1791, 1792, 1793, 1794, 1795, 1796, 1797, 1798, 1799, 1800, 1801, 1802, 1803, 1804, 1805, 1806, 1807, 1808, 1809, 1810, 1811, 1812, 1813, 1814, 1815, 1816, 1817, 1818, 1819, 1820, 1821, 1822, 1823, 1824, 1825, 1826, 1827, 1828, 1829, 1830, 1831, 1832, 1833, 1834, 1835, 1836, 1837, 1838, 1839, 1840, 1841, 1842, 1843, 1844, 1845, 1846, 1847, 1848, 1849, 1850, 1851, 1852, 1853, 1854, 1855, 1856, 1857, 1858, 1859, 1860, 1861, 1862, 1863, 1864, 1865, 1866, 1867, 1868, 1869, 1870, 1871, 1872, 1873, 1

a — принцип назначения линейных и клиновых припусков;

85

Для определения численных значений данных припусков в течение длительного времени использовались аналитические зависимости расчета значений поперечного и продольного укорочения конструкции и центральных углов ее изгиба:

$$\Delta B = \left(\sum_{i=1}^m W_i + \sum_{j=1}^n V_j \right) \frac{1}{F_i}; \quad (1)$$

$$\Phi_b = \left(\sum_{i=1}^m W_i z_i + \sum_{j=1}^n V_j z_j \right) \frac{1}{J_i}; \quad (2)$$

$$\Delta L = \left(\sum_{j=1}^n W_j + \sum_{i=1}^m V_i \right) \frac{1}{F_b}; \quad (3)$$

$$\Phi_i = \left(\sum_{j=1}^n W_j z_j + \sum_{i=1}^m V_i z_i \right) \frac{1}{J_b}, \quad (4)$$

где $\Delta B, \Delta L$ — соответственно поперечное и продольное укорочения сечения, см;

Φ_b, Φ_i — соответственно продольный и поперечный углы поворота концов сечения в плоскости набора, рад;

m — количество продольных швов;

n — количество поперечных швов;

F_i, F_b — площади сечения сечения, соответственно, в продольном и поперечном направлениях, см²;

J_i, J_b — моменты инерции площадей F_i, F_b , см⁴;

W, V — соответственно объемы поперечного и продольного укорочения, см³;

z_i, z_j — соответственно расстояния от центров тяжести объемов W, V до центральной оси.

Это несколько изменило отношение к понятию «точная деталь». «Точной» стали называть деталь номинальной формы с учетом введения в нее компенсационных припусков, поскольку деталь именно такой формы вырезалась из листа машинной термической резки с числовым программным управлением (МТР с ЧПУ) и определяла точность конструкции. В настоящее время способы оценки сварочных деформаций корпусных конструкций получили существенное развитие на основе использования методов конечных элементов. Комплексное изложение последних достижений в этом направлении приведено в докторской диссертации В. И. Алферова [3]. На рис. 4 приведен вариант расчета деформации танкера с использованием методов конечных элементов.

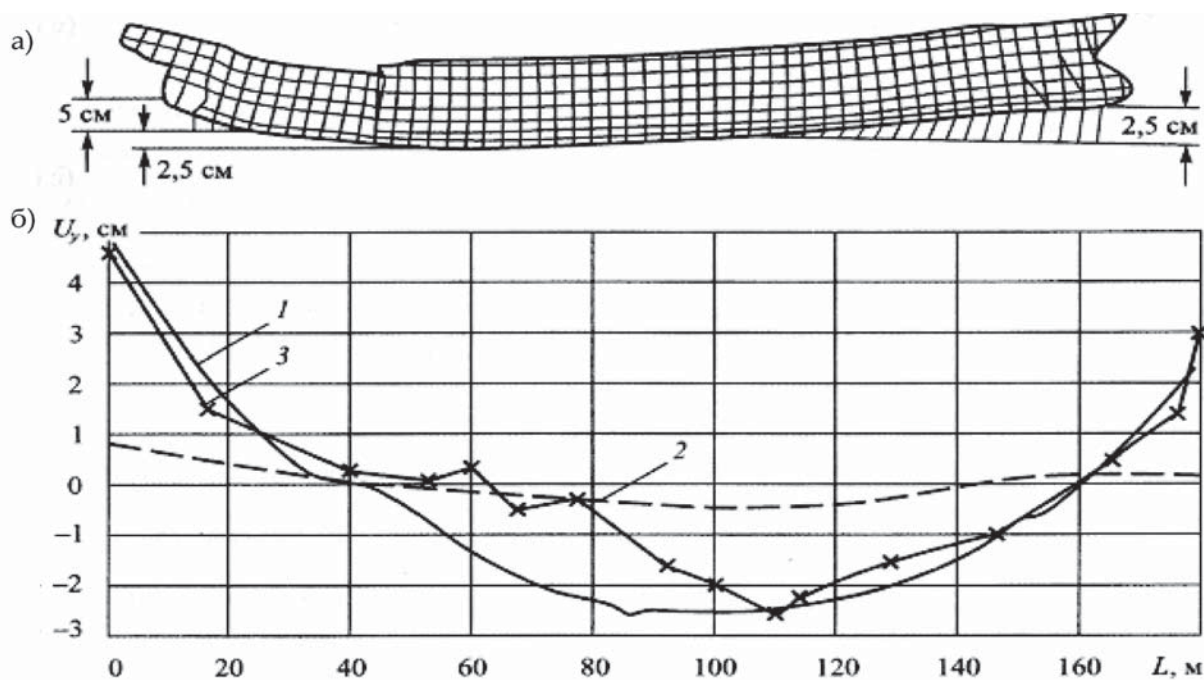


Рис. 4. Результаты оценки сварочных деформации корпуса танкера с использованием методов конечных элементов:

a — деформации корпуса танкера; *б* — график зависимости сварочных деформаций

Однако применяемые технологии сборки и сварки деталей, вырезаемых с учетом компенсационных припусков, все равно не обеспечивают во всех случаях получение необходимого эффекта. Основная причина состоит в том, что расчетные методы определения параметров общих деформаций не учитывают возможные несоблюдения сварочных зазоров, катетов сварных швов и других элементов технологической дисциплины. Поэтому они используются лишь частично.

Практика показала, что для повышения эффективности данных методов необходимо разработать способы компенсации сварочных деформаций без помощи припусков. При таком подходе в случае разработки автоматизированных технологий сборки в качестве оборудования для автоматизации сборки «каркаса» могут использоваться уже существующие на западном рынке специализированные роботы, для внедрения которых каких-либо новых научно-технических решений не потребуется. Поэтому уровень их совершенствования и автоматизации процесса сборки может постоянно увеличиваться параллельно с конструктивным совершенствованием сборочно-сварочного оборудования. В то же время задача повышения точности собираемых деталей каркаса имеет широкие возможности для совершенствования. В частности, реализация такого подхода требует полного пересмотра существующих понятий, связанных с точностью изготовления каркаса судовых конструкций.

Имеющееся сегодня на заводах оборудование с ЧПУ для вырезки плоских деталей из листового проката при определенной доработке системы аналитической детализировки в состоянии обеспечить точность сборки корпусных конструкций, необходимую для автоматизации их изготовления. Однако для объемных деталей обшивки корпуса судна, изготавливаемых с применением холодной гибки, анализ существующих решений в области повышения точности показал, что в ближайшие 10–15 лет аналогичного увеличения точности их изготовления не произойдет. Поэтому в статье проанализирован вариант автоматизации сборки корпусных конструкций, в основе которого заложены только возможности точности вырезки листовых деталей на МТР с ЧПУ.

В принципе, сборка без припусков из деталей, вырезаемых на МТР с ЧПУ, возможна, если модель корпусной конструкции, используемую для решения задач аналитической детализировки, растянуть и изогнуть в направлениях, противоположных сварочным деформациям. В этом случае вырезанные и собранные без сварки детали будут формировать удлиненную и изогнутую конструкцию в сторону, обратную сварочным деформациям, а после сварки изменения геометрии собранной конструкции приведут ее к номинальному виду.

Введенные изменения в математическую модель конструкции приведут к тому, что геометрия всех деталей, входящих в состав корпусной конструкции, получит незначительные изменения не по одной кромке, а по всему контуру (интегрированные изменения контура). Минимальные значения данных изменений будут лежать в пределах 0,1 мм. Однако сумма всех изменений будет компенсировать общие сварочные деформации конструкции, возникающие при ее изготовлении, в пределах существующих допусков на отклонения размеров. При таком подходе отпадает необходимость проектирования схемы припусков и определения параметров изменения положения мест установки элементов набора в контуровочных эскизах. Необходимо лишь изменить геометрию математической (электронной) модели конструкции, а далее выполнять работы по определению формы всех деталей, их вырезки и последующей сборки, не задумываясь о последующих сварочных деформациях (делать «кривое», которое в результате сварочных деформаций должно стать «прямым»). Понятно, что описанный вариант является лишь концептуальной версией. На практике его реализация в полном объеме пока возможна только для конструкций, в состав набора которых входят детали, вырезаемые на МТР с ЧПУ.

Для деталей набора, изготавливаемых из профильного проката с использованием холодной гибки на ребро, ввести в их форму интегральные изменения аналогично листовым деталям сегодня не представляется возможным. Однако для конструкций с листовым набором данный подход можно реализовывать уже сегодня. В частности, для задания криволинейных поверх-

ностей в системах аналитической детализации уже начинают использовать кубические NURBS поверхности [4], [5]. Если с помощью такого подхода задать поверхность нейтрального слоя конструкции, то тогда, применяя топологические преобразования, можно растянуть и изогнуть его в объемах сварочных деформаций и относительно нового нейтрального слоя конструкции сделать перерасчет всей модели. Кроме того, с началом использования для проектирования трехмерной модели судна предпринимаются отдельные попытки учитывать в номинальной форме детали, помимо компенсационных мероприятий, также и сварочные зазоры. В связи с этим предлагается изменить принцип формирования электронной модели описания конструкции для решения задач аналитической детализации. Вначале модель формируется, как обычно, по данным чертежа. Однако далее она используется не для расчетного определения формы деталей, а для формирования модели конструкции «первого уровня», учитывающей все мероприятия для компенсации сварочных деформаций (растяжку и изгиб). После чего полученная электронная модель конструкции будет использоваться для создания «точной модели конструкции», в составе которой будут описаны все элементы для привязки необходимых параметров сварочных швов к расчетной форме деталей. Именно второй уровень «точной электронной модели конструкции» предлагается использовать для определения форм «точных деталей» с помощью средств аналитической детализации. Таким образом, в случае их сборки на прихватках с соблюдением сварочных зазоров после сварки в любом случае будет получаться конструкция, описанная в модели конструкции «первого уровня». Только такой подход позволит описать технологию сварки корпусной конструкции в числовом виде для автоматизированного оборудования сборки и сварки корпусной конструкции.



Рис. 5. Сборка корпусной конструкции на каркасе

Для того, чтобы исключить погрешности гибки листовых деталей обшивки, необходимо полностью перейти на технологию сборки на каркасе (рис. 5). При таком подходе в случае разработки автоматизированных технологий сборки в качестве оборудования для автоматизации сборки «каркаса» могут использоваться уже существующие на западном рынке специализированные роботы, для внедрения которых каких-либо новых научно-технических решений не потребуется. Поэтому уровень их совершенствования и уровень автоматизации процесса сборки может постоянно повышаться параллельно с конструктивным

совершенствованием сборочно-сварочного оборудования. В то же время, задача повышения точности собираемых деталей каркаса имеет большие перспективы для совершенствования на основе комплексных научных исследований. В частности, для решения задачи увеличения точности изготовления деталей судового набора можно заменять гнутые детали из профильного проката на эквивалентные по прочности детали, вырезаемые из листа. Это позволит изготавливать их на МТР с ЧПУ с учетом интегрированных изменений формы для компенсации сварочных деформаций в процессе обычной аналитической детализации. Результаты расчетной оценки такой возможности, выполненной на примере замены балок набора длиной 1 м с присоединенным пояском шириной 167 мм и толщиной 10 мм, изготавливаемых из полособульба на детали, вырезаемые из листа с эквивалентным моментом сопротивления, приведены в таблице.

**Сравнительная характеристика балок набора из полособульба
и деталей, вырезаемых из листа**

Детали	h , мм	s , мм	Теоретическая масса одного метра профиля, кг	W_x с присоединённым пояском, см ³
Полособульб № 8	80	5	4,58	88,2
балка	90	8	4,71	87,8
Полособульб № 9	90	5,5	5,52	105
балка	100	8	5,1	103
Полособульб № 10	100	6	6,76	123
балка	110	9	6,3	121
Полособульб № 12	120	6,5	8,75	159
балка	130	10	8,1	158,3
Полособульб № 14а	140	7	11,05	196,5
балка	150	10	9,2	193
Полособульб № 16а	160	8	14,08	237
балка	170	11	11,3	234

Расчеты показали некоторое увеличение толщины и высоты эквивалентных балок. Уравнивание весовых характеристик балок возможно за счет применения различных конструктивных решений. В частности, в ряде случаев можно использовать вырезы в зоне нейтрального слоя, однако это тема отдельного исследования. В данном случае важно, что замена деталей из профильного проката на детали, вырезаемые из листа с помощью МТР с ЧПУ, может существенно расширить область применения автоматизированной технологии сборки и сварки корпусных конструкций в судостроении.

Список литературы

1. *Веселков В. В.* Решение задач технологической подготовки судостроительного производства с помощью ЭВМ: аналит. обзор / В. В. Веселков. — ЦНИИ «Румб», 1989.
2. *Горбач В. Д.* Повышение точности изготовления плоскостных корпусных конструкций / В. Д. Горбач // Судостроение. — 1966. — № 2. — С. 76 – 83.
3. *Алферов В. Д.* Методы расчета сварочных деформаций и напряжений судовых корпусных конструкций: монография / В. Д. Алферов. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. — 309 с.
4. *Ситников А. Н.* Разработка методов геометрического моделирования в автоматизированных системах технологической подготовки производства в судостроении: дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1997.
5. *Томашевский В. Н.* Имитационное моделирование в среде GPSS: учеб. пособие / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. — М.: Бестселлер, 2003. — 123 с.