

#### DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003

# MODELING OF EDGES OF OPENINGS IN CASES OF OBJECTS OF UNDERWATER SHIPBUILDING

#### S. A. Rusanovskiy, M. P. Khudyakov, N. I. Cherenkov

Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov in Severodvinsk, Severodvinsk, Russian Federation

By the construction of modern objects of underwater shipbuilding there is a critical question of increase in accuracy of welding of various designs in the strong case. First of all preparation of edges of openings in the strong case strongly influences accuracy. In view of the big thickness of case designs and any provisions of the welded objects the surface of cutting of an opening under welding has irregular shape. Application of curvilinear cutting under welding, characteristic of other industries in similar tasks, in shipbuilding is not used owing to technological problems by processing. Opening and processing of openings are made on a building berth in the manually that determines the low accuracy of production. When determining geometry of cutting methods of descriptive geometry are applied. One of the ways that allows to increase cardinally the accuracy of production of openings is application of mobile technological complexes with numerical program control. However the lowered rigidity is characteristic of them in comparison with stationary machines, usually applied to machining. Effective application of mobile technological complexes with numerical program control requires the mathematical description of a surface of cutting of edges of openings under welding. In article typification of openings is considered and categories of openings are entered depending on situation them concerning the surface of the case. The class and a type of a surface of cutting of openings under welding is defined. Standard requirements of standard literature to the accuracy of production of openings are considered. The general equation of a surface of an edge of a facet is defined. Main types of orientation of welded saturation of rather main strong case are chosen. As an example the problem of crossing of two cylinders (the strong case and the flange of saturation) is solved and options of turn of the small cylinder of rather basic coordinate axes are considered.

Keywords: objects of underwater shipbuilding, pressure hull, welding of flanges, edge of openings, ruled surface, crossing of cylinders.

#### For citation:

Rusanovskiy, Sergey A., Mikhail P. Khudyakov, and Nikolai I. Cherenkov. "Modeling of edges of openings in cases of objects of underwater shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.

## УДК 629.128

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРОМОК ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСАХ ОБЪЕКТОВ ПОДВОДНОГО КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ

## С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков

Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске, Северодвинск, Российская Федерация

При постройке современных объектов подводного кораблестроения остро встает вопрос повышения точности вварки различных конструкций в прочный корпус. В первую очередь на точность изготовления оказывает большое влияние подготовка кромок отверстий в прочном корпусе. Ввиду большой толщины корпусных конструкций и произвольного положения ввариваемых объектов, поверхность разделки отверстия под сварку имеет сложную форму. Применение криволинейной разделки под сварку, характерной для других отраслей промышленности в подобных задачах, в кораблестроении не используется вследствие технологических проблем при обработке. Вскрытие и обработку отверстий производят вручную, что определяет низкую точность изготовления. При определении размерных параметров разделки применяются методы начертательной геометрии. Одним из способов, позволяющих кардинально повысить точность изготовления отверстий, является применение мобильных технологических комплексов с числовым программным управлением. Однако для них характерна пониженная жесткость по сравнению со стационарными станками, обычно применяемыми для механической обработки. Для эффективно-



го применения мобильных технологических комплексов с числовым программным управлением требуется математическое описание поверхности разделки кромок отверстий под сварку. В статье рассмотрена типизация отверстий и вводятся категории отверстий в зависимости от положения их относительно поверхности корпуса. Определен класс и вид поверхности разделки отверстий под сварку. Рассмотрены типовые требования нормативной литературы к точности изготовления отверстий. Определено общее уравнение поверхности кромки фаски. Выбраны основные виды ориентации вварного насыщения относительно основного прочного корпуса. В качестве примера решена задача пересечения двух цилиндров (прочный корпус и фланец насыщения) и рассмотрены варианты поворота малого цилиндра относительно базовых координатных осей.

Ключевые слова: объекты подводного кораблестроения, прочный корпус, вварка насыщения, кромка отверстия, линейчатая поверхность, пересечение цилиндров.

#### Для цитирования:

2018 rog. Tom 10. Nº 5

*Русановский С. А.* Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.

#### **Введение (Introduction)**

Повышенные требования к техническим характеристикам и задачи внедрения новых прогрессивных технологий вызывают необходимость применения при изготовлении корпусов подводных лодок (ПЛ) современных средств автоматизации производства и робототехники [1]. Одним из «узких мест» в процессе производства ПЛ является комплекс работ по вварке в прочный корпус различного насыщения. Как правило, элементы насыщения имеют форму кругового цилиндра различного диаметра под вварку в корпус. Анализ корпусной спецификации объектов подводного кораблестроения показывает, что на одном объекте под вварку насыщения вскрывается более 500 отверстий диаметром больше 100 мм, расположенных в разных пространственных положениях [2]. Большая часть отверстий расположена по нормали к общивке. Порядка 20 % из них (около 100 единиц) имеют другие варианты ориентации оси отверстий относительно базовых корабельных координатных плоскостей.

Особые сложности возникают при выполнении отверстий большого диаметра (диаметром от 0,3 м) в условиях, когда вскрытие и обработка этих отверстий производятся на уже собранном корпусе, что исключает возможность вскрытия с помощью стационарных программно-управляемых станков, и вскрытие производится ручным способом [3]. Помимо этого, согласно требованиям нормативных документов по подготовке кромок под сварку, кромки отверстий, расположенных по нормали к обшивке, описывались одним видом разделки кромок под сварку (рис. 1), остальные отверстия — двумя видами разделки (с различными сварочными узлами) — см. ГОСТ 5264-80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные».



Рис. 1. Виды разделки: а — Х-образная разделка; б — V-образная разделка

В общем виде подготовка кромок отверстий регламентирована ГОСТами, альбомами сварочных узлов, конструкторскими и технологическими инструкциями, в которых указаны следу-



ющие данные: геометрия разделки, способы ее построения и методы контроля. Типовые требования к точности обработки фаски кромок под сварку следующие: отклонение линии начала фаски «гребешка» от своего положения 0 ... +2 мм. Допуск на угол фаски зависит от вида подготовки (механическим или тепловым способом) и колеблется от 1° (для механической обработки) до 5° (при тепловой резке). В целом требования к точности подготовки кромок под сварку типичные для судовых корпусных конструкций и на порядок менее строгие по сравнению с требованиями для функциональных поверхностей изделий общего машиностроения. Однако и эти требования не всегда удается выполнить, особенно, если работы проводятся в условиях стапеля.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

Технология выполнения отверстий в корпусе и подготовка разделки отверстия под сварку может быть различной в зависимости от вида производства. Например, сначала в корпусе для прохода насыщения выполняется вырез, затем по периметру выполненного отверстия снимаются фаски для разделки требуемой формы. Такой способ подготовки отверстий под сварку соответствует применяемому в настоящее время ручному производству [4]. При использовании средств автоматизации производства возможно и предпочтительно производить вскрытие отверстий с одновременной разделкой кромок под сварку. Успешное внедрение средств автоматизации технологической подготовки при механической обработке корпусных конструкций в рамках конкретных производственных условий требует формализованного представления обрабатываемых поверхностей, пригодного для использования на специализированном оборудовании с числовым программным управлением.

Рассмотрим геометрию кромок отверстия при прямолинейной разделке кромок под сварку, при этом уточним, что при *V*-образной разделке будет одна поверхность, а при *X*-образной разделке — две взаимопересекающиеся поверхности одного вида. Для отверстий рассматриваемого типа характерно также совместное использование *V*- и *X*-образной разделки [5]. В достаточно общем виде поверхность разделки кромки отверстия может быть представлена в виде поверхности двоякой кривизны (криволинейная разделка). Для достижения технологичности и с учетом требований нормативной документации необходимо, чтобы эта поверхность являлась *линейчатой*. В случае вварки в корпус ПЛ деталей насыщения цилиндрической формы естественным решением представляется выбор формы фаски в виде поверхности дважды косого цилиндроида, образованного движением прямой *l* вдоль двух криволинейных направляющих: *P*'( $\theta$ ) и *P*»( $\theta$ ), где  $\theta$  — некоторый параметр [6]. Естественно принять в качестве линейной направляющей ось цилиндра насыщения, а криволинейные направляющие расположить на обшивке корпуса так, чтобы они образовывали границы фаски (рис. 2).



Рис. 2. Поверхность разделки на дважды косом цилиндроиде



Так как криволинейные направляющие  $P'(\theta)$  и  $P''(\theta)$  расположены вокруг цилиндра ввариваемого комингса насыщения, положение точек на них при описании косого цилиндроида может задаваться углом  $\theta$ , который образует проекция радиус-вектора точек линейчатой поверхности на плоскость, перпендикулярную оси цилиндра насыщения с некоторым начальным положением этой проекции (рис. 3).



*Рис. 3.* Пояснение записи векторного уравнения дважды косого цилиндроида

В этом случае векторное уравнение линейчатой поверхности имеет вид

$$\overline{r_1}(\theta, \lambda) = \overline{\rho}(\theta) + \lambda \overline{S}(\theta), \tag{1}$$

где  $\theta$  — параметр, определяющий положение плоскости, в которой лежит прямая l, соединяющая точки A и B на кривых  $P'(\theta)$  и  $P''(\theta)$ ;  $S(\theta)$  — единичный вектор, задающий направление образующей прямой l, проходящей через точки A и B на кривых  $P'(\theta)$  и  $P''(\theta)$  и ось z;  $\lambda$  — параметр, определяющий положение произвольной точки на образующей прямой l, проходящей через точки A, B и ось  $\overline{Oz}$ ;  $\overline{\rho}(\theta)$  — радиус-вектор точки A в системе координат  $\overline{Oxyz}$ , связанной с цилиндром насыщения.



Рис. 4. Построение к получению уравнения прямолинейной образующей

Так как образующая прямая l лежит в плоскости, определяемой углом  $\theta$ , проходящей через ось z, уравнение прямой, проходящей через любые точки A и B на криволинейных образующих (рис. 4), можно представить в виде



$$\overline{z} = z_1 + (r - r_1) \tan \alpha = \overline{z}_1 + (r - r_1) \frac{\overline{z}_2 - \overline{z}_1}{r_2 - r_1}, \qquad (2)$$

где  $r = \sqrt{\overline{x}^2 + \overline{y}^2}, r_1 = \sqrt{\overline{x_1^2} + \overline{y_1^2}}, r_2 = \sqrt{\overline{x_2^2} + \overline{y_2^2}}.$ 

Окончательно уравнение для задания прямой образующей имеет следующий вид:

$$\overline{z} = \overline{z_1} + \left(\sqrt{\overline{x}^2 + \overline{y}^2} - \sqrt{\overline{x_1^2} + \overline{y_1^2}}\right) \frac{\overline{z_2} - \overline{z_1}}{\sqrt{\overline{x_2^2} + \overline{y_2^2}} - \sqrt{\overline{x_1^2} + \overline{y_1^2}}}.$$
(3)

#### Результаты (Results)

Для получения уравнений криволинейных образующих  $P'(\theta)$  и  $P''(\theta)$  линейчатой поверхности необходимо рассмотреть задачу пересечения цилиндра, задающего положение ввариваемой детали с обшивкой прочного корпуса (ПК). При этом ПК может состоять из цилиндрических, конических и сферических участков. Введем типизацию получаемых при пересечении отверстий в зависимости от расположения оси ввариваемого цилиндра относительно обшивки ПК и корабельной системы координат.

Предусмотрены следующие места расположения оси отверстия на цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций:

 – на цилиндрических поверхностях в плоскостях, параллельных плоскости мидель-шпангоута (перпендикулярно основной плоскости и под углом к ней);

- на цилиндрических поверхностях в плоскостях, параллельных диаметральной плоскости;

– на конусном переходе в диаметральной плоскости (ДП) и плоскостях, повернутых относительно оси *ОХ* на произвольный угол;

– на сферической переборке в ДП и плоскостях, повернутых относительно оси *OX* на произвольный угол;

 – по нормали к обшивке (на цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций);

 произвольным образом (на цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций);

Пусть даны два круговых цилиндра разного диаметра, один из которых (с меньшим радиусом) соответствует цилиндру насыщения, а другой (с большим радиусов) относится к прочному корпусу ПЛ, при этом ось малого цилиндра перпендикулярна основной плоскости и отстоит от ДП на расстоянии a (рис. 5). Введем корабельную систему координат Oxyz: ось Ox направлена по оси большого цилиндра (прочного корпуса ПЛ) из кормы в нос, ось Oy направлена на левый борт, ось Oz перпендикулярна первым двум и направлена вверх [7].

В общей системе координат Охуг уравнение большого цилиндра имеет вид

$$y^2 + z^2 = R_1^2$$
 при  $-\infty < x < \infty$ . (4)

В той же системе координат уравнение малого цилиндра при наложенных выше ограничениях запишется следующим образом:

$$x^{2} + (y - a)^{2} = R_{2}^{2} \operatorname{при} -\infty < z < \infty.$$
(5)

Для определенности  $R_1 > R_2$ , a — координата точки пересечения оси малого цилиндра с плоскостью xOy по оси Oy, т. е.  $a = y_{O1}$ 

Найдем линию пересечения цилиндров. Для удобства введем местную систему координат, связанную с меньшим цилиндром  $O_1\overline{xyz}$  (рис. 5). За центр системы координат примем точку  $O_1$ , находящуюся на пересечении оси этого цилиндра с плоскостью xOy общей системы координат. Ось  $O_1z$  направим вдоль оси, т. е. в направлении оси Oz, а оси  $O_1\overline{x}$  и  $O_1\overline{y}$  — в направлении осей Ox и Oy соответственно. Таким образом, связь между системами координат Oxyz и  $O_1\overline{xyz}$  описывается соотношениями:

$$\overline{x} = x; \, \overline{y} = y - a; \, \overline{z} = z. \tag{6}$$





В местной системе координат  $O_1 \overline{xyz}$  положение точки пересечения цилиндров задается концом вектора  $r(\theta)$ , где параметр  $\theta$  характеризует его движение вдоль линии пересечения. В качестве параметра  $\theta$  можно принять угол между осью  $O_1 \overline{x}$  и проекцией вектора  $r(\theta)$  на плоскость  $\overline{x}O_1 \overline{y}$ . Координаты конца вектора  $\overline{x}(\theta)$ ,  $\overline{y}(\theta)$ ,  $\overline{z}(\theta)$  будут определять параметрическое уравнение линии пересечения цилиндров. Координаты  $\overline{x}(\theta)$  и  $\overline{y}(\theta)$ , как видно из рис. 5,  $\delta$ , будут:

$$\overline{x}(\theta) = R_2 \cos\theta; \ \overline{y}(\theta) = R_2 \sin\theta.$$
(7)

Для определения  $\overline{z}(\theta)$  воспользуемся уравнением (4), выразив предварительно общие координаты через местные по формулам:

$$x = \overline{x}; y = \overline{y} + a; z = \overline{z}.$$
(8)

Тогда имеем

 $(\overline{y}+a)^2 + \overline{z}^2 = R_1^2$ 

и с учетом, что  $\overline{y}(\theta) = R_2 \sin \theta$ , можно записать

$$\overline{z} = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}.$$
(9)

Объединив формулы (7) и (9), получим параметрическое уравнение линии пересечения рассматриваемых цилиндров в местной системе координат:

$$\overline{x}(\theta) = R_2 \cos \theta;$$
  

$$\overline{y}(\theta) = R_2 \sin \theta;$$
  

$$\overline{z}(\theta) = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2} \quad .$$
(10)

Уравнения линии пересечения рассматриваемых цилиндров в общей системе координат:

$$x(\theta) = R_2 \cos \theta;$$
  

$$y(\theta) = R_2 \sin \theta + a;$$
  

$$z(\theta) = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}.$$
(11)

Рассмотрим два варианта поворота малого цилиндра:

- относительно оси *OX*;

- относительно оси ОҮ.



Ось малого цилиндра находится в плоскости yOz, образует с осью Oz угол  $\alpha$  и пересекается с плоскостью xOy в точке с координатами (0; с).

Вводим вспомогательную систему координат Ox'y'z', начало которой совпадает с началом общей системой координат, т. е. с точкой O, а плоскость x'Oy' перпендикулярна оси малого цилиндра. Её связь с местной системой координат  $O_1\overline{xyz}$  и общей системой координат OXYZ определяется соотношениями (рис. 6):

$$x' = \overline{x}; \ y' = \overline{y} + a; \ z' = \overline{z}; \tag{12}$$

$$x = x', y = y' \cos \alpha - z' \sin \alpha, z = y' \sin \alpha + z' \cos \alpha.$$
(13)



*Рис. 6.* Пересечение двух цилиндров, малый под углом наклона к диаметральной плоскости

Координата *a*, определяющая отстояние точки пересечения оси малого цилиндра с плоскостью *x'Oy'* от начала координат этой системы, определяется в виде

$$a = c \cdot \cos \alpha, \tag{14}$$

Зависимости (12) позволяют свести данную задачу к рассматриваемой ранее. С учетом уравнения (10) получим уравнения линии пересечения в системе координат *Ox'y'z'*:

$$x' = R_2 \cos \theta;$$
  

$$y' = R_2 \sin \theta + a;$$
  

$$z' = \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}.$$
(15)

Подставляя уравнения (15) в уравнения (13), найдем уравнения пересечения цилиндров в общей системе координат *Охуz*:

$$x = R_2 \cos \theta;$$
  

$$y = R_2 (\sin \theta + a) \cos \alpha - \sqrt{R_1^2 - (R_2 \cdot \sin \theta + a)^2} \sin \alpha;$$
  

$$z = R_2 (\sin \theta + a) \sin \alpha + \sqrt{R_1^2 - (R_2 \cdot \sin \theta + a)^2} \sin \alpha.$$
(16)

Заметим, что переход от системы координат Ox'y'z' к системе координат Oxyz выполняется поворотом вокруг Ox и может быть осуществлён через матрицу преобразования координат:

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = [A]_x \begin{cases} x' \\ y' \\ z' \end{cases},$$
 (17)

2018 год. Том 10. № 5 999



<sub>где</sub> 
$$[A]_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

#### Вариант поворота малого цилиндра относительно оси уOz.

Ось малого цилиндра находится в плоскости, параллельной плоскости х"Ог", и образует с осью *z* угол β (рис. 7).



Рис. 7. Положение пересекающихся цилиндров в рассматриваемых системах координат (малый цилиндр под углом наклона к плоскости мидель-шпангоута)

Вводим вспомогательную систему координат Ох"у"г", начало которой совпадает с О, а плоскость *х"Оу"* перпендикулярна оси малого цилиндра. Уравнения связи координат:

$$x'' = \overline{x}; y'' = \overline{y} + a; z'' = \overline{z};$$
(18)

$$x = x'' \cos\beta + z'' \sin\beta; y = y''; z = -x'' \sin\beta + z'' \cos\beta;$$
(19)

Уравнения линии пересечения цилиндров в системе координат Ох"у"г" аналогичны уравнениям (11) или (15):

$$x'' = R_2 \cos \theta;$$
  

$$y'' = R_2 \sin \theta + a;$$
  

$$z'' = \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}.$$
(20)

Уравнения линии пересечения в общей системе координат Охуг получаются подстановкой уравнения (20) в уравнение (19) или с помощью матрицы поворота системы координат Ox»y»z» относительно оси *Оу* на угол β:

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = [A]_{y} \begin{cases} x'' \\ y'' \\ z'' \end{cases},$$
(21)

носительно оси 
$$Oy$$
 на угол  
  
где  $[A]_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$ 

0

## Обсуждение (Discussion)

В общем случае дважды косой цилиндроид является поверхностью отрицательной гауссовой кривизны и не может быть развернут на плоскость без разрывов и складок. При рассмотрении поверхности на рассматриваемом участке разделки одна из кривизны поверхности близка к нулю.



Таким образом, ее, в принципе, можно аппроксимировать развертываемой поверхностью с определенными допущениями при соблюдении требований точности с запасом.

Рассматриваемую первую криволинейную направляющую также можно аппроксимировать с помощью сопряженных круговых дуг или с определенными допущениями [8], [9]. Полученные аналитические зависимости в матричной форме позволяют получать тривиальными преобразованиями как прямое, так и обратное решения задачи формообразования рассмотренных разделок. Это, в свою очередь, позволяет решать ряд оптимизационных задач, связанных с преодолением проблем производительности и точности подготовки отверстий под вварку ответственных деталей насыщения в корпус подводных аппаратов. В частности, появляется возможность использования всего потенциала мобильных технологических комплексов с программным управлением, в том числе с параллельной кинематикой [10]. На основе полученного решения оптимизировать процесс обработки можно не только обобщенно на всей поверхности разделки, но и на сколь угодно малых ее участках с учетом текущей жесткости технологической системы.

Полученные решения позволяют программировать не только обработку рассматриваемых поверхностей, но и автоматизировать контроль с помощью включаемых в состав технологического комплекса контрольно-измерительных устройств. Это становится возможным как на этапе подготовки обработки по реальной форме корпуса на обрабатываемом участке, так и после обработки, на этапе приемочного контроля.

После определения аналитических зависимостей поверхности разделки можно также рассмотреть вариант уменьшения сварочных деформаций корпусных конструкций путем сохранения постоянства площади поперечного сечения сварного шва с помощью изменения угла фаски с учетом технологичности сварочных операций [11].

#### Выводы (Results)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проанализирована номенклатура и дана классификация отверстий для вварки деталей насыщения в корпусах объектов подводного кораблестроения.

2. Предложено для формирования разделки под вварку деталей насыщения использовать линейчатые поверхности.

3. Определен класс линейчатых поверхностей и получено уравнение дважды косого цилиндроида для описания поверхности разделки под сварку.

4. Выявлена особенность поверхности дважды косого цилиндроида – на практически используемом участке она близка к поверхности с нулевой кривизной и может быть аппроксимирована развертываемыми поверхностями.

5. Показана возможность использования для задания кромок фасок линий пересечения цилиндра насыщения с обшивкой прочного корпуса.

6. Получены параметрические уравнения для описания линии пересечения цилиндра насыщения с обшивкой прочного корпуса при различной ориентации оси этого цилиндра относительно плоскостей корабельной системы координат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Будниченко М. А.* Модернизация конструкторско-технологической подготовки производства и процессов строительства кораблей / М. А. Будниченко, А. Ю. Спиридонов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2015. — № 90 (374). — С. 187–194.

2. Шушарин Ф. Н. Атомные подводные лодки. Технология судостроения: в 5 ч. Ч. 1: Технология и организация постройки. Основные положения / Ф. Н. Шушарин, В. П. Бородин, Н. П. Власов, А. В. Власова, В. Г. Даценко. — Северодвинск: ФГУП «ПО «Севмашпредприятие»; Севмашвтуз, 2004. — 456 с.

3. *Алферов В. И.* Расчетная оценка объемов пригоночных работ при сборке монтажных соединений судовых корпусных конструкций на основе размерного анализа / В. И. Алферов // Судостроение. — 2010. — № 6 (793). — С48–52.

ВЕСТНИК ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА МОРСКОТО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

4. Шушарин Ф. Н. Атомные подводные лодки. Технология судостроения: в 5 ч. — Ч. 3: Технология и организация стапельно-сдаточных производств / Ф. Н. Шушарин, Р. А. Ануфриев, Е. И. Баев, Б. В. Борисов, В. П. Бородин [и др.]. — Северодвинск: ФГУП «ПО «Севмашпредприятие»; Севмашвтуз, 2004. — 503 с.

5. Русановский С. А. Вопросы формообразования кромок отверстий в цилиндрических оболочках /

С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. — 2017. — № 3. — С. 23–27.

6. *Кривошапко С. Н.* Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов, С. М. Халаби. — М.: Наука, 2006. — 544 с.

7. *Князев Д. Н.* Построение линии пересечения двух цилиндров в параметрическом виде / Д. Н. Князев, Е. С. Устинова // Технические науки в России и за рубежом: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Москва, янв. 2015 г.). — М.: Буки-Веди, 2015. — С. 122–125.

8. *Агеев В. Н.* Метод построения сопряженных круговых дуг / В. Н. Агеев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2017. — Т. 20. — № 2. — С. 126–134.

9. Yang X. Planar point set fairing and fitting by arc splines / X. Yang, G.Wang // Computer-Aided Design. — 2001. — Vol. 33. — Is. 1. — Pp. 35–43. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00059-2.

10. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / В. В. Веселков, М. А. Кобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 82–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89.

11. 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.

#### REFERENCES

1. Budnichenko, Mikhail A., and Aleksandr Yu. Spiridonov. "Upgrading design & technological support of production and ship construction processes." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 90(374) (2015): 187–194.

2. Shusharin, F. N., V. P. Borodin, N. P. Vlasov, A.V. Vlasova, and V. G. Datsenko. *Atomnye podvodnye lodki*. *Tekhnologiya sudostroeniya: v 5-ti chastyakh. Ch. 1. Tekhnologiya i organizatsiya postroiki. Osnovnye polozheni-ya*. Severodvinsk: FGUP «PO«Sevmashpredpriyatie»; Sevmashvtuz, 2004.

3. Alfyorov, V. I. "Estimated evaluation of fitting amount when assembling ship hull structures erection joints on the basis of dimensional analysis." *Shipbuilding* 6(793) (2010): 48–52.

4. Shusharin, F. N., R. A. Anufriev, E. I. Baev, B. V. Borisov, V. P. Borodin, et al. *Atomnye podvodnye lodki*. *Tekhnologiya sudostroeniya: v 5-ti chastyah. Ch. 3. Tekhnologiya i organizaciya stapel'no - sdatochnyh proizvod-stv.* Severodvinsk: FGUP «PO«Sevmashpredpriyatie»; Sevmashvtuz, 2004.

5. Rusanovsky, S. A., M. P. Khudyakov, and N. I. Cherenkov. "Questions of shape forming of the cushions of holes in cylindrical shells." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sevmashvtuza* 3 (2017): 23–27.

6. Krivoshapko, S. N., V. N. Ivanov, and S. M. Halabi. *Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informaciya k raschetu na prochnost' tonkih obolochek.* M.: Nauka, 2006.

7. Knyazev, D. N., and E. S. Ustinova. "Postroenie linii peresecheniya dvuh cilindrov v parametricheskom vide." *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf. (g. Moskva, yanvar' 2015 g.)*. M.: Buki-Vedi, 2015. 122–125.

8. Ageyev, Vladimir N. "Method of conjugated circular arcs tracing." *Civil Aviation High TECHNOLOGIES* 20.2 (2017): 126–134.

9. Yang, Xunnian, and Guozhao Wang. "Planar point set fairing and fitting by arc splines." *Computer-Aided Design* 33.1 (2001): 35–43. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00059-2.

10. Veselkov, V. V. and M. A. Kobec. "Principles of realization and development of the technology of the automated manufacturing of hull constructions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 82–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89.

11. Alferov, V. D. Metody rascheta svarochnyh deformacij i napryazhenij sudovyh korpusnyh konstrukcij: monografiya. SPb.: FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr», 2014.



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Русановский Сергей Александрович —

старший преподаватель Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6 e-mail: s.rusanovskiv@narfu.ru Худяков Михаил Павлович кандидат технических наук, доцент Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6 e-mail: m. khudyakov@narfu.ru Черенков Николай Иванович кандидат технических наук, доцент Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6

e-mail: n.cherenkov@narfu.ru

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Rusanovskiy, Sergey A. —

Senior lecturer Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov in Severodvinsk 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, **Russian Federation** e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru Khudyakov, Mikhail P. -PhD, associate professor Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov in Severodvinsk 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, **Russian Federation** e-mail: m. khudyakov@narfu.ru Cherenkov, Nikolai I. -PhD, associate professor Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov in Severodvinsk 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, **Russian Federation** e-mail: n.cherenkov@narfu.ru

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г. Received: September 17, 2018.