

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ФАСКИ ОТВЕРСТИЙ ПОД ВВАРКУ НАСЫЩЕНИЯ В КОРПУСАХ ОБЪЕКТОВ ПОДВОДНОГО КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ

С.А. Русановский, М.П. Худяков (Северодвинск),
Г.Б. Бузик (Санкт-Петербург)

Введение

При постройке крупных технологических объектов, таких как подводные лодки, корпуса химических реакторов, или изделия атомной промышленности, требуется обрабатывать множество отверстий для сварки насыщения в прочный корпус. Отверстия могут располагаться произвольным образом, их число достаточно велико.

Актуальность представленной темы определяется необходимостью автоматизации процесса обработки отмеченных отверстий на базе единых цифровых моделей как самого объекта производства, так и процесса движения его «цифрового двойника» по технологическим этапам.

Цель работы – создание корректного описания разделки фасок отверстий в толстолистовых конструкциях, позволяющего интегрировать данные в современное цифровое производство. На рисунке 1 представлено типовое расположение отверстий в толстолистовых конструкциях и пример оформления узла разделки из нормативной документации. Отверстия могут быть выполнены в цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций.

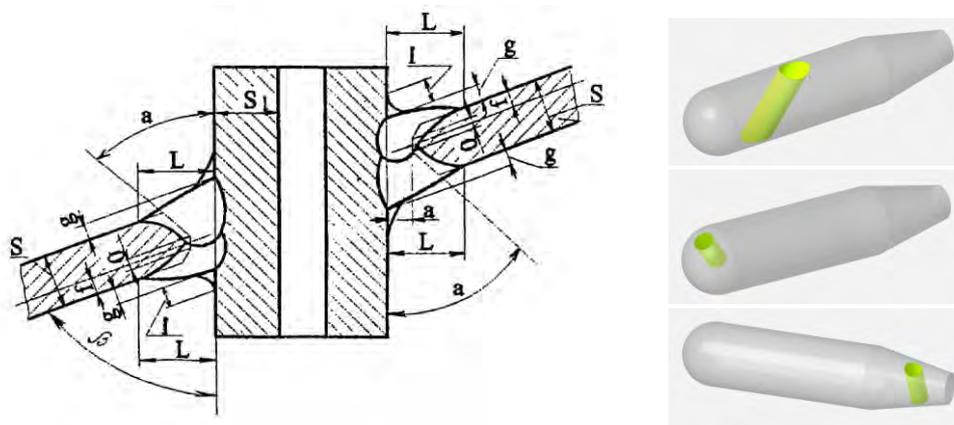


Рисунок 1 – Типовой сварочный узел для рассматриваемых вырезов

Методы и материалы

Согласно существующей технологии выполнения геометрии разделки используется метод сечений с получением координат с точностью всего 1 мм, которые наносятся ручным способом на корпус. Для возможности адаптации под условия цифрового производства необходимо разработать формализованное описание геометрии разделки. При анализе поверхности разделки был определен её тип – линейчатая поверхность с отрицательной гауссовой кривизной, подвид – дважды косо́й цилиндроид (рис. 2).

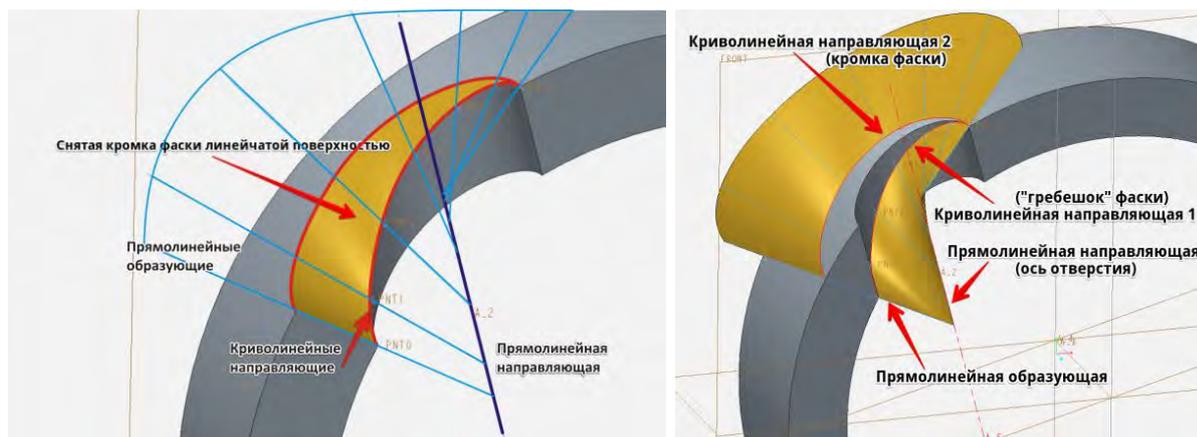


Рисунок 2 – Геометрия разделки фаски

При анализе линейчатой поверхности отмечено, что для фаски с постоянным углом притыкания к привариваемому фланцу поверхность представляет собой косоугольный коноид. В этом случае для формирования самой поверхности необходимо иметь только уравнение криволинейной направляющей, так как прямолинейная направляющая совпадает с осью отверстия, а прямолинейная образующая имеет постоянный угол к прямолинейной направляющей. В случае с цилиндроидом еще нужна закономерность изменения угла образующей к оси отверстия.

Следовательно, для создания математической модели поверхности разделки в первую очередь необходимо определить уравнение первой криволинейной направляющей. После определения типа поверхности разделки была составлена базовая математическая модель линии пересечения для цилиндрического, сферического и конического участков обечайки [1 – 3]. Далее был выполнен анализ распределения толщины относительно средней линии обечайки и при расположении отверстия, отличном от нормали.

Результаты

После создания математической модели поверхности разделки была создана методика геометрического моделирования, которая позволяет сформировать условия для автоматизированного получения геометрии разделки кромки и обработки их с помощью ЧПУ, а также контроля этой поверхности. При использовании распространённых твердотельных САПР существующий метод для описания разделки кромок, основанный на классических методах начертательной геометрии и табличном представлении данных, не даёт возможности для автоматизированного получения геометрии разделки. После получения первой криволинейной направляющей можно воспользоваться кинематической операцией протягивания, и поверхность разделки формируется в результате перемещения эскиза фаски одновременно с булевой операцией удаления материала.

Рассмотрим получение криволинейной образующей на цилиндрических участках обечайки [2]. Для оболочечного цилиндра с выполненным отверстием, обозначенным $C5$ на схеме, в плоскости, параллельной плоскости мидель-шпангоута, строим плоскую плавную кривую $S1$. После построения сплайна строим цилиндрическую поверхность $P1$, которую получаем движением прямолинейной образующей параллельно оси оболочки. Пересечение цилиндрической поверхности и поверхности кромки отверстия $C5$ даёт нам требуемую криволинейную направляющую $S2$, которая является искомой криволинейной направляющей.

При рассмотрении методики геометрического моделирования на сферических или конических участках есть принципиальное отличие от прямого кругового цилиндра. Оно заключается в невозможности простого получения тел другими

операциями, кроме вращения. А цилиндр можно рассмотреть, как прямоугольную призму с основанием в виде окружности, что определяет разницу в методике построения. Рассмотрим получение криволинейной образующей на сферических поверхностях при условии, что ось отверстия располагается произвольным образом в плоскости, проходящей через ось сферы. В этой плоскости строим плоскую плавную кривую $S1$ (рис. 3) между самыми удаленными точками на кромке отверстия в этой плоскости. Далее, используя построенную кривую как образующую, строим поверхность вращения $V1$. Пересечение поверхностей вращения $V1$ и поверхности цилиндра насыщения $C4$ даёт нам требуемую криволинейную направляющую $S2$, которая определяет криволинейную направляющую коноида поверхности фаски. Это допущение будет справедливым, если кривая $S1$ не выходила за пределы толщины оболочки, центр её кривизны находился внутри оболочки. Построенная кривая $S2$ далее может быть использована для построения косоугольного коноида, формирующего поверхность фаски.

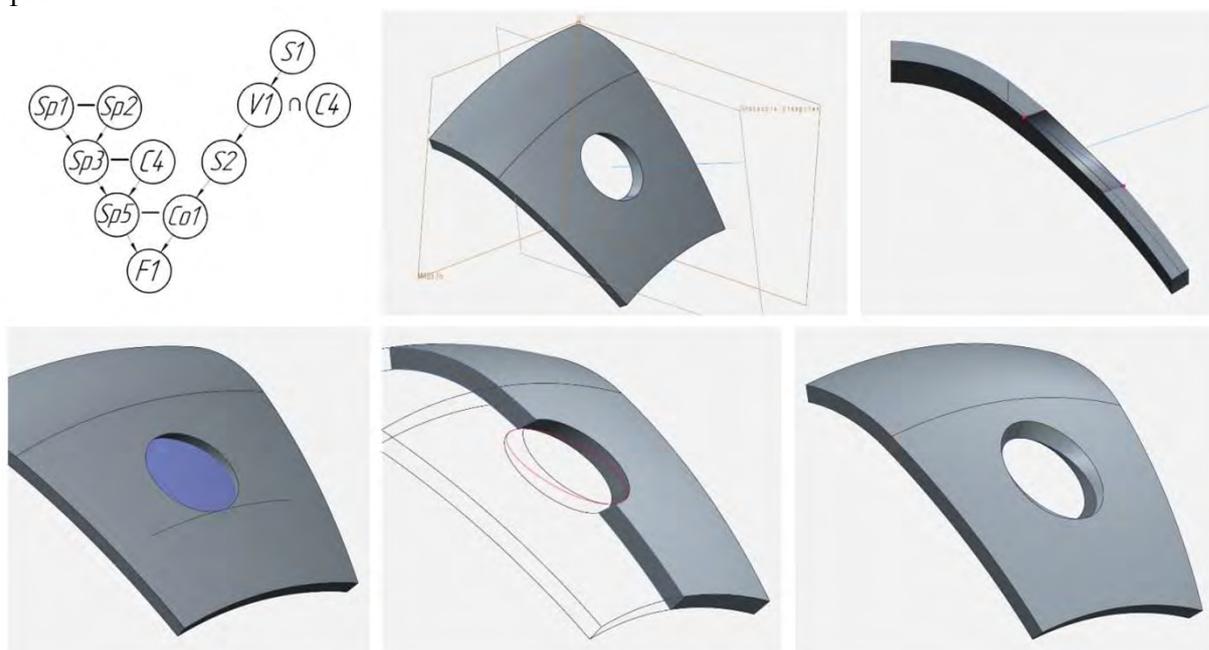


Рисунок 3 – Методика построения на сферических или конических оболочках

Заметим, что все геометрические объекты и операции над ними, приведённые на рисунках 2 и 3, реализуются при помощи стандартных операций твердотельного моделирования в базовых распространённых системах, применяемых при проектировании. Также отметим, что в этом случае теряется сущность математических преобразований, свойственная аналитическим методам. Это не всегда позволяет оценить точность и корректность формообразования сопряженных поверхностей при обработке изделий на оборудовании с числовым программным управлением.

Идеальным вариантом математической реализации приведённых выше построений является математическое описание координат в матричной форме в однородных координатах [3].

Плоская плавная кривая $S1$ [2], как уже отмечалось, это сплайн, который необходимо моделировать по определенным точкам в каждом конкретном случае. Что не эффективно с точки зрения временных затрат и тяжело реализуемо с помощью создания однозначного математического аппарата. Поэтому совместно с методикой геометрического моделирования предлагается вариант геометрической аппроксимации плоской плавной кривой на основе плоских соединённых или сопряженных круговых дуг (биарок). Их преимущества заключаются в своей относительной простоте,

нативной реализации в САМ системах и однозначного математического определения в традиционном аналитическом виде. При моделировании плоской плавной кривой S1 многочисленными плоскими сопряженными дугами получаемая геометрия будет совпадать с геометрией, построенной по принятой методике в пределах принятой погрешности построения. При аппроксимировании сплайна одной или несколькими плоскими дугами получаемая геометрия будет совпадать в пределах допусков, указанных в нормативной документации.

Эксперимент

Для апробации математической и геометрической моделей разделок был подготовлен и проведен эксперимент, который включал две части – компьютерную и натурную. В компьютерном эксперименте необходимо провести верификацию и валидацию предлагаемых моделей в качестве замены для геометрии разделки, создаваемой по действующей технологии. Он проведен для отверстия в цилиндрическом участке обечайки, после чего была построена поверхность разделки по предлагаемой методике и выполнено сравнение с использованием системы ПО PolyWorks Inspector (рис. 4). На рисунке представлены отклонения по получаемым поверхностям: наибольшее значение отклонений достигает $2,5 \div 3$ мм, среднее значение отклонений $0,2 \div 0,4$ мм.

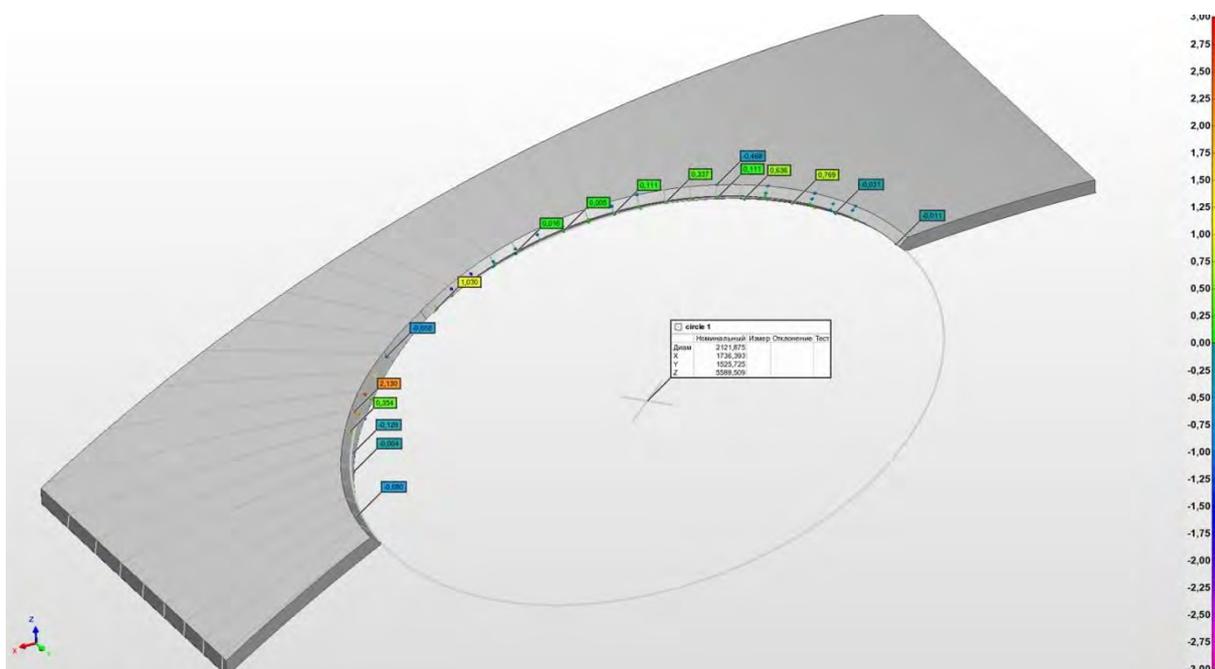


Рисунок 4 – Погрешность построения в компьютерном эксперименте

Большие отклонения объясняются следующими причинами:

- «плавающий» угол фаски;
- отсутствие однозначного алгоритма построения и недостаточная точность создания плазовых эскизов;
- неполное соответствие проекции линии гребешка и внутренней направляющей плоскому сплайну S1;
- использование в эксперименте всего четырех сопряженных дуг для построения сплайна.

Натурный эксперимент проводился для верификации и валидации комплекса научно-технических решений, включающего в себя математическую и геометрическую модели, модель обработки, технологическое оборудование и средства контроля. Для

моделирования был выбран небольшой участок кромки отверстия на сферической оболочке. Показанный на рисунке 5 участок позволяет верифицировать и валидировать модель, схему обработки и получаемые результаты. По длине этого участка должны находиться минимум два сечения, предусмотренные нормативной документацией. Это необходимо для последующего сравнения 3D модели и действительной поверхности. Выбор конкретного фрагмента обрабатываемой поверхности определялся по самому неблагоприятному стечению влияющих факторов, которое в совокупности приводит к наибольшей податливости технологической системы.

Эксперимент проводился на базе компании ООО «ПроИнтеграция» с использованием следующего оборудования: робот-манипулятор KUKA KR 270, шпиндель воздушного охлаждения, цилиндрическая фреза диаметром 6 мм. Материал модели – экструдированный пенополистирол. Сканирование готового образца проводилось с помощью измерительной руки HEXAGON Absolute Arm с установленным сканером RS6 в бесконтактном режиме. Программа обработки была подготовлена в пакете SprutCAM14 Robot (рис. 5), две поверхности при обработке выполнялись в чистовом варианте – поверхность разделки и верхняя часть участка сферы.

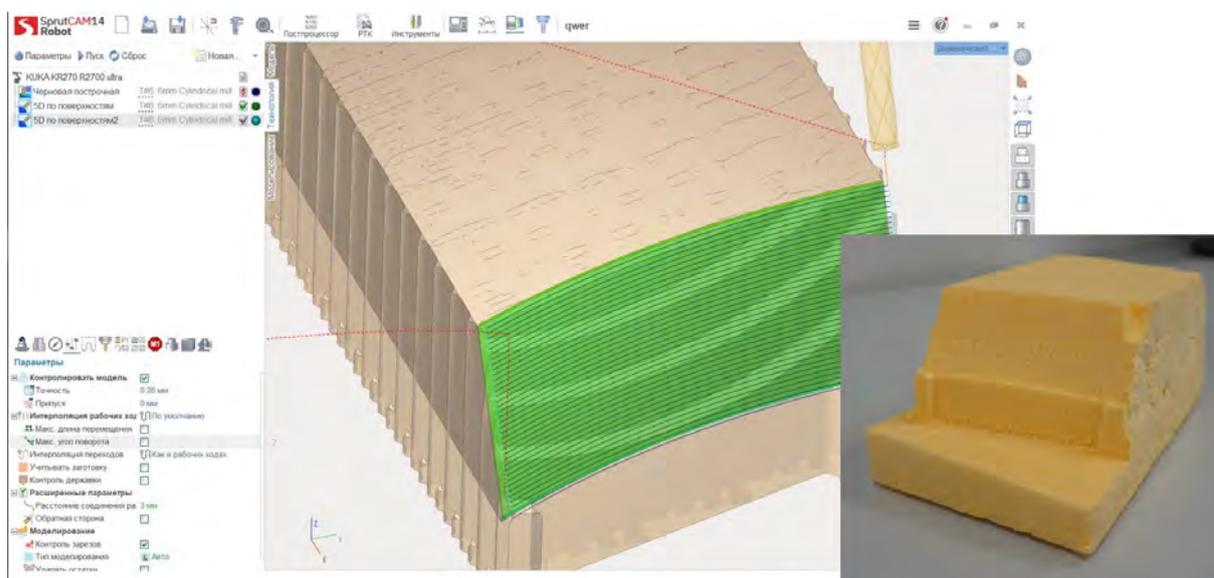


Рисунок 5 – САМ-обработка и итоговый результат

После выполнения образцов было выполнено сканирование, которое показало максимальную погрешность, достигающую 0,62 мм, средние погрешности от 0,2 до 0,4 мм. Большие значения погрешностей могут быть объяснены неоптимальностью стандартных стратегий обработки, применяемых для специфических задач, в которых способ обработки должен находиться в соответствии с другими параметрами технологического комплекса.

Заключение

В заключение можно отметить основные результаты работы:

- разработаны математический и геометрический аппараты поверхности разделки;
- проведены эксперименты и выполнены верификация и валидация эксперимента.

Для продолжения рассматриваемой работы в качестве дальнейших шагов в контексте цифровизации корпусного производства целесообразно рассмотреть

создание специальных технологических комплексов и создание комплексной методики для проектирования нестандартного технологического оборудования.

Открыта возможность расширенной модернизации сварочных узлов по типам и видам разделки.

Планируется продолжение серии экспериментов на сталях типа АБ 2 с помощью роботов-манипуляторов.

Литература

1. **Русановский С. А., Худяков М. П., Черенков Н. И.** Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10. № 5. С. 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.
2. **Русановский С.А., Худяков М.П., Черенков Н.И.** Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под вварку насыщения // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1. Том 1. С. 28-37. DOI 10.37220/МИТ.2020.47.1.006.
3. **Русановский С. А., Худяков М. П., Черенков Н. И.** Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения. Часть 2. Математическое описание кромок отверстий в сферических и конических участках корпусов // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №4. Том 4-1. С. 41-48. DOI 10.37220/МИТ.2020.50.4.004.