Технология и организация судостроения и судоремонта

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-7>
УДК 512.7: 623.8: 681

Г.Ш. Цициашвили, М.А. Осипова, О.В. Колесникова, В.Е. Лелюхин

ЦИЦИАШВИЛЛИ ГУРАМИ ШАЛВОВИЧ – д.ф-м.н., профессор,
e-mail: guram@iam.dvo.ru

ОСИПОВА МАРИНА АНАТОЛЬЕВНА – к.ф-м.н., доцент, e-mail: mao1975@list.ru

Отдел системных исследований

Институт прикладной математики ДВО РАН (ДВФУ)

Радио ул. 7, Владивосток, Россия, 690041

КОЛЕСНИКОВА ОЛЬГА ВАЛЕРЬЕВНА – к.т.н., доцент, e-mail: miis@mail.ru

ЛЕЛЮХИН ВЛАДИМИР ЕГОРОВИЧ – к.т.н., доцент, e-mail: lelv0@mail.ru

Кафедра технологий промышленного производства Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул. 8, Владивосток, Россия, 690091

Формальная интерпретация задачи поиска технологических баз и синтеза последовательности обработки поверхностей детали

Аннотация. Синтез комплектов баз и схем базирования и проектирование последовательности обработки поверхностей – одна из важнейших задач проектирования технологии, в том числе в судостроении и судоремонте. Эту задачу можно сформулировать как определение последовательности разно-ориентированных положений детали относительно формообразующих движений инструмента. В статье излагается формальная интерпретация обобщенного алгоритма поиска технологических баз и синтеза последовательности обработки поверхностей детали с помощью алгоритма направленного поиска на основе комплекса размерных связей между поверхностями в пространстве соответствующих степеней свободы.

Основу синтеза составляет моделирование процесса обработки с помощью алгоритма направленного поиска поверхностей, реально существующих в текущий момент в конфигурации детали. Именно эти поверхности могут быть использованы в качестве баз для ее ориентации при обработке новых (еще не существующих) поверхностей относительно формообразующих движений инструмента. В математической интерпретации модели используется комплекс связанных ациклических графов, отображающих размерные связи между поверхностями детали для каждой из степеней свободы рассматриваемого пространства. Условиями поиска решений в примененном алгоритме являются: 1) наличие реально существующих поверхностей для использования в качестве баз; 2) наличие еще не обработанных поверхностей; 3) наличие размерных связей между реально существующими и обрабатываемыми поверхностями, необходимых и достаточных для ориентации обрабатываемых поверхностей; 4) одноступенчатая (однопереходная) обработка любой поверхности детали. Приведенная в статье формальная интерпретация плоскостной задачи поиска технологических баз и синтеза последовательности обработки поверхностей может служить основой для синтеза схем базирования в трехмерном пространстве с шестью степенями свободы.

Ключевые слова: цифровое судостроение, судоремонт, проектирование технологии, формализация проектирования, базирование деталей, обработка поверхностей.

Введение

Тенденция цифровизации общества, проникновение в сферу судостроительного производства технологических роботов, широкое использование оборудования с числовым программным управлением и необходимость ускорения подготовки производства требуют дальнейшего развития формальных инструментов и методов на основе теоретических разработок, описывающих реальные процессы и взаимосвязи между объектами. Для повышения эффективности судостроительных предприятий требуется разработка систем управления на основе современных достижений цифровых технологий, с учетом необходимого и достаточного информационного обеспечения [2].

Основной проблемой на пути организации цифрового производства (СІМ) в судостроении и судоремонте является невозможность автоматического формирования технологий обработки и сборки деталей и узлов [1]. Применяемые на сегодняшний день системы автоматизированного проектирования технологических процессов являются не более чем инструментом выбора типовых операций или процессов из специализированной базы данных [21].

Для повышения эффективности судостроительных предприятий требуется разработка систем управления на основе современных достижений цифровых технологий, с учетом необходимого и достаточного информационного обеспечения. Практика применения существующих систем автоматизации управления ресурсами сложных производств характеризуется рядом проблем, связанных с несогласованностью организационного взаимодействия подразделений и служб; чрезвычайной сложностью, а зачастую и невозможностью стыковки CAD, PLM и ERP систем; отсутствием формальных методов для автоматизации подготовки технологических процессов (бизнес-процессов); корректного производственного планирования при изменении выпускаемой продукции [1].

К одному из первых системных подходов к разработке технологических процессов можно отнести идею типизации технологических процессов, изложенную в 30-х годах прошлого столетия профессором А.П. Соколовским [3, 4]. В основе типизации технологических процессов лежит попытка поставить в прямое соответствие элементы множества отработанных на практике технологий элементам множества конструкций. Это позволяет с некоторой долей приближения быстро подобрать описание процесса аналога для изготовления деталей. Кроме указанного подхода в нашей стране давно обсуждается вопрос о проектировании единичных технологических процессов, однако из-за отсутствия целостной формализованной системы проектирование выполняется по наитию и имеет существенные различия в разных технологических школах.

За рубежом использование компьютерных технологий для планирования процесса производства сформировалось четыре десятилетия назад. С тех пор активно ведутся научно-исследовательские работы в области автоматизации процесса планирования САРР (Computer-Aided Process Planning), которые представляют практически полный аналог САПР ТП (систем автоматизированного проектирования технологических процессов) в России. Основными причинами разработки САРР являются сокращение трудоемкости формирования технологических инструкций и повышение качества принимаемых решений [9, 10, 21]. Задачи САРР систем – определение технологий и параметров, необходимых для преобразования заготовки в готовую деталь (изделие). Планирование процессов изготовления включает в себя интерпретацию проектных данных, формирование операций и определение их последовательности для изготовления деталей, подбор станков и режущих инструментов, определение параметров резания, выбор оснастки и приспособлений, а также расчет затрат времени обработки [21].

Проблеме формализации проектирования технологий и интеграции CAD, САРР и ERP систем посвящены работы многих современных зарубежных авторов: Ван Л. (Wang L.) [18, 19], Галеви Г. (Halevi G.) [9, 10], Гао Л. (Gao L.) [13–15], Рейд Р.Д. (Reid, R. D.) [16], Сандерс Н.Р. (Sanders, N. R.) [16], Юсоф Ю. (Yusof Y.) [21] Хриссолурис Г. (Chrysosolouris G.) [7], и др. В зарубежной практике для определения и формирования технологической информации в си-

стемах CAPP используется несколько подходов, основные – вариативный и генеративный подходы [9, 11, 21].

Вариативный подход, как следует из названия, создает план процесса как вариант существующего плана, при этом наиболее распространенным инструментом является так называемая групповая технология (GT – group technology). GT использует сходство между деталями, для их классификации в семействах элементов [21]. В сопоставлении с отечественными подходами, можно сказать, что он скорее является аналогом проектирования на основе типовых технологий и их элементов.

В последнее время в зарубежной практике наблюдается тенденция развития генеративного подхода [9, 11]. В этом типе CAPP синтезируются различные данные процесса, такие как знание геометрии компонента, материал компонента, спецификации станков, режущие инструменты и устройства для удержания, последовательность операций и производственные затраты для создания плана процесса [20]. Однако несмотря на это, вариантный подход продолжают использовать некоторые компании-производители [21].

При проектировании технологических процессов изготовления деталей любых конструкций машин и механизмов решаются два комплекса технологических задач, один из которых связан с поиском и подбором технологий обеспечения свойств материала детали, а другой – с формированием реальной геометрической конфигурации, обеспечивающей окончательную форму каждой поверхности детали и их взаимное (относительное) расположение [1, 12].

Взаимное расположение поверхностей, иными словами, геометрическая структура детали определяется линейными и угловыми размерными связями между ними [1]. Влияние структуры размерных связей на формирование общей технологии, и в частности последовательности обработки поверхностей детали, показано в работах [1, 12]. Учитывая существование взаимосвязи между геометрической структурой и технологией ее получения, можно сформулировать набор правил формального синтеза полного набора (множества) вариантов последовательности обработки поверхностей.

Для формализации решения ряда технологических задач с учетом состава поверхностей и структуры их взаимосвязей в работах авторов данной статьи предлагается использовать отображение положения каждой поверхности обрабатываемой детали в трехмерном пространстве в виде шестимерного вектора с указанием фиксируемых степеней свободы $\{X_l, Y_l, Z_l, X_a, Y_a, Z_a\}$ [1, 12]. Для этого размерные связи между поверхностями представляются в виде графов, где вершинами являются поверхности, а ребра соответствуют размерным связям одновременно для всех шести степеней свободы [1, 12, 17]. При этом количество возможных вариантов расстановки размеров определяется с помощью формулы А. Кэли, в соответствии с которой количество остовных деревьев в полном графе на n вершинах равно n^{n-2} [17]. Следует отметить, что задача поиска решений относится к классу NP-сложных, поскольку количество рассматриваемых вариантов чрезвычайно велико даже в пределах одной степени свободы и резко возрастает с увеличением числа поверхностей [5, 6, 19]. Например, для детали, имеющей 10 поверхностей, число возможных сочетаний размерных связей составляет 100 000 000, а для детали с числом поверхностей 20 количество вариантов исчисляется $262\,144 \times 10^{18}$.

Одной из краеугольных задач проектирования технологии изготовления является определение последовательности разноориентированных положений детали относительно формообразующих движений инструмента, иными словами, выбор комплектов баз и схем базирования и проектирование последовательности обработки поверхностей [17]. В настоящей статье излагается формальная интерпретация обобщенной задачи поиска технологических баз и синтеза последовательности обработки поверхностей детали с помощью алгоритма направленного поиска на основе комплекса размерных связей между поверхностями в пространстве соответствующих степеней свободы.

Содержательная постановка задачи

Геометрическая конфигурация детали определяется набором бесконечно протяженных поверхностей и конечным набором заданных отношений их взаимной ориентации. Таким образом, геометрическая конфигурация детали является областью определения технологии формирования геометрии детали. Множество вариантов расстановки размерных связей между поверхностями детали для каждой степени свободы определяется как количество остовных деревьев в графе, где вершинами обозначены поверхности, а ребрами размерные связи [1, 12].

Для изложения сути задачи используется некоторое упрощение, заключающееся в первоначальном рассмотрении примера в виде плоской детали в 2-мерном пространстве. Для двумерного пространства общее количество степеней свободы равно 3, из них 2 – количество линейных движений, а вращательных равно 1. Таким образом, в рассматриваемом случае имеется три степени свободы, из которых две представляют собой линейные перемещения и третья – поворот.

Деталь рассматривается как плоское замкнутое полупространство, ограниченное определенным образом расположенными линиями (сторонами). В начальном состоянии (перед началом обработки) деталь представляется в виде заготовки, ограниченной только реально существующими необработанными (черновыми) сторонами.

Задача заключается в формальном описании для моделирования процесса обработки с помощью алгоритма направленного поиска поверхностей, реально имеющих в текущий момент на детали, которые могут быть использованы в качестве баз для ее ориентации при обработке заданных поверхностей относительно формообразующих движений инструмента.

Формальное представление задачи поиска последовательности обработки

Условиями поиска решений в примененном алгоритме являются: 1) наличие реально существующих поверхностей для использования в качестве баз; 2) наличие еще не обработанных поверхностей; 3) наличие размерных связей между реально существующими и обрабатываемыми поверхностями, необходимых и достаточных для ориентации обрабатываемых поверхностей; 4) одноступенчатая (однопереходная) обработка любой поверхности детали.

На рис. 1 изображен чертеж плоской детали, имеющей форму многоугольника G с множеством сторон $P = \bigcup_{k=1}^m P_k$. Каждое подмножество $P_k = \{l_1^k, \dots, l_{n_k}^k\}$ состоит из параллельных сторон, $n_k \geq 1, 1 \leq k \leq m$. Стороны, входящие в различные подмножества, не являются параллельными. Каждой стороне l_1^k сопоставляется существующая «черновая» сторона g^k исходной детали.

Рис. 1. Чертеж детали $G^{1,2}$

Алгоритм последовательного выбора сторон для обработки основан на следующем предположении. Пусть многоугольник G является пересечением многоугольников

$G^{1,2} \supseteq G^{1,2,3} \supseteq \dots \supseteq G^{1,2,\dots,m} = G$. Многоугольник $G^{1,2}$ состоит из сторон, входящих в множество $P^1 \cup P^2$, многоугольник $G^{1,2,3}$ состоит из сторон, входящих в множество $P^1 \cup P^2 \cup P^3$ и т.д. Сначала обрабатываются все стороны множества P^1 , затем обрабатываются все стороны множества P^2 , все стороны множества P^3 и т.д.

Множеству сторон P^k сопоставляются два идентичных взвешенных дерева Γ^k, Γ_k , вершинами которых являются стороны из множества P^k . Вес ребер дерева Γ^k определяют расстояния между сторонами, а вес ребер дерева Γ_k – углы между ними (в нашем случае это нулевые углы). Если сторона l_1^k обработана, то тогда с помощью взвешенных деревьев Γ^k, Γ_k , фиксируя уже обработанную сторону, можно обработать связанную с ней ребром ранее необработанную сторону. В этом случае обработанная сторона фиксируется специальным приспособлением, позволяющим выдерживать расстояние и угол между обработанной и необработанной сторонами. Таким образом, основным моментом в алгоритме обработки сторон многоугольника является последовательная обработка сторон $l_1^1, l_1^2, \dots, l_1^m$.

Алгоритм обработки сторон

При $m=2$ данная задача решена в работе [18]. Ее решение основано на следующем построении графов $\Gamma^{1,2}, \Gamma_{1,2}$. Граф $\Gamma^{1,2}$ состоит из не связанных между собой дерева Γ^1 , к которому присоединено ребро (l_1^1, g^1) , и дерева Γ^2 с присоединенным к нему ребром (l_1^2, g^2) , как показано на рис. 2.

Рис. 2. Граф $\Gamma^{1,2}$, состоящий из деревьев $\Gamma^1, (l_1^1, g^1)$; $\Gamma^2, (l_1^2, g^2)$.

Граф $\Gamma_{1,2}$ состоит из дерева Γ^1 с присоединенным к нему ребром g^1 и дерева Γ^2 . Эти два дерева связаны ребром, начинающимся в вершине l_1^1 дерева Γ^1 и оканчивающимся в вершине l_1^2 (рис. 3).

Рис. 3. Граф $\Gamma_{1,2}$, состоящий из деревьев $\Gamma^1, (l_1^1, g^1)$; Γ^2 , соединенных ребром (l_1^1, l_1^2) .

Для обработки вершины l_1^2 следует зафиксировать сторону g^2 и выдержать расстояние между сторонами l_1^2 , g^2 . В свою очередь, угловое расположение стороны l_1^2 определяется фиксацией стороны l_1^1 и выдерживанием угла между ней и стороной l_1^2 . Таким образом, графы $\Gamma^{1,2}$, $\Gamma_{1,2}$ позволяют определить обработку сторон l_1^1 , l_1^2 .

Алгоритм последовательной обработки сторон многоугольника $G = G^{1,2}$ выглядит следующим образом: $R = g^1 \rightarrow l_1^1 \rightarrow \dots \rightarrow l_{n_1}^1 \rightarrow l_1^2 \rightarrow \dots \rightarrow l_{n_2}^2$. В упрощенном виде последовательность R можно представить в виде $R = g^1 \Rightarrow T^1 \Rightarrow T^2$, где $T^1 = l_1^1 \rightarrow \dots \rightarrow l_{n_1}^1$, $T^2 = l_1^2 \rightarrow \dots \rightarrow l_{n_2}^2$.

Перейдем теперь к случаю $m=3$ и предположим, что исходный многоугольник удовлетворяет соотношению $G = G^{1,2,3} \subseteq G^{1,2}$ и определены графы $\Gamma^{1,2}$, $\Gamma_{1,2}$, характеризующие многоугольник $G^{1,2}$ (рис. 4).

Рис. 4. Чертеж детали $G^{1,2,3}$.

Чтобы перейти к обработке стороны l_1^3 , необходимо на чертеже указать сторону $l_{1,2} \in P^1 \cup P^2$ и пересекающую ее пунктирную прямую $f^{1,2}$, параллельную одной из сторон $l^{1,2} \in P^1 \cup P^2$.

Для этого построим граф $\Gamma^{1,2,3}$ (рис. 5), характеризующий линейные размеры многоугольника $G^{1,2,3}$, путем присоединения к графу $\Gamma^{1,2}$ не связанного с ним подграфа Γ^3 и ребра $(l^{1,2}, f^{1,2})$, обозначенного на рис. 5 пунктиром. При этом пунктирная линия $f^{1,2}$ (рис. 4) представляет собой вершину графа (рис. 5). Линия $f^{1,2}$ пересекает на чертеже сторону $l_{1,2}$, определяя тем самым точку пересечения (рис. 4), вокруг которой поворачивается сторона $l_{1,2}$, чтобы построить сторону l_1^3 .

Рис. 5. Граф $\Gamma^{1,2,3}$, состоящий из деревьев Γ^1 , (l_1^1, g^1) , $(l^{1,2}, f^{1,2})$; Γ^2 , (l_1^2, g^2) ; Γ^3 .

В свою очередь, угловые размеры многоугольника G характеризуются графом $\Gamma_{1,2,3}$ (рис. 6), определяемым присоединением к графу $\Gamma_{1,2}$ дерева Γ^3 ребром (l_1^1, l_1^3) . Это ребро определяет угол между сторонами l_1^1, l_1^3 , начинающийся в точке пересечения пунктирной прямой $f^{1,2}$ с прямой $l^{1,2}$.

Рис. 6. Граф $\Gamma_{1,2,3}$, состоящий из деревьев $\Gamma^1, (l_1^1, g^1), (l_1^{1,2}, f^{1,2})$; Γ^2 ; Γ^3 , соединенных ребрами $(l_1^1, l_1^3), (l_1^1, l_1^2)$.

Таким способом определяются в графах $\Gamma^{1,2,3}, \Gamma_{1,2,3}$ вершины, соединенные с вершиной l_1^3 (стороной многоугольника $G^{1,2,3}$). Тогда последовательность обработки сторон многоугольника G определяется как $R \Rightarrow T^3$, где $T^3 = l_1^3 \rightarrow \dots \rightarrow l_{n_3}^3$.

Методом индукции перейдем теперь к случаю $m > 3$, иллюстрируя его на рисунках 7–9 при $m=4$. Предположим, что многоугольник $G = G^{1,\dots,m+1} \subseteq G^{1,\dots,m} \subseteq \dots \subseteq G^{1,2}$, определены графы $\Gamma^{1,\dots,m}, \Gamma_{1,\dots,m}$ и задана последовательность обработки сторон многоугольника $G^{1,\dots,m}$.

Рис. 7. Чертеж детали $G^{1,2,3,4}$.

Чтобы перейти к обработке стороны l_1^{m+1} , необходимо на чертеже детали указать сторону $l_{1,\dots,m} \in P^1 \cup \dots \cup P^m$ и пересекающую ее пунктирную прямую $f^{1,\dots,m}$, параллельную стороне $l_{1,\dots,m} \in P^1 \cup \dots \cup P^m$.

Построим теперь граф $\Gamma^{1,\dots,m+1}$, характеризующий линейные размеры многоугольника $G^{1,\dots,m+1}$, путем присоединения к графу $\Gamma^{1,\dots,m}$ не связанного с ним подграфа Γ^{m+1} и пунктирного ребра $(l_1^{1,\dots,m}, f^{1,\dots,m})$. На чертеже пунктирная сторона $f^{1,\dots,m}$ пересекается с ребром $l_{1,\dots,m}$. В точке этого пересечения на чертеже начинается сторона l_1^{m+1} .

Рис. 8. Граф $\Gamma^{1,2,3,4}$, состоящий из деревьев
 $\Gamma^1, (l_1^1, g^1), (l_1^{1,2}, f^{1,2}); \Gamma^2, (l_1^2, g^2); \Gamma^3, (l_1^{1,2,3}, f^{1,2,3}); \Gamma^4.$

В свою очередь, угловые размеры многоугольника G характеризуются графом $\Gamma_{1,\dots,m+1}$, определяемым присоединением к графу $\Gamma_{1,\dots,m}$ графа Γ^{m+1} ребром (l_1^1, l_1^{m+1}) и пунктирного ребра $(l_1^{1,\dots,m}, f^{1,\dots,m})$.

Рис. 9. Граф $\Gamma_{1,2,3,4}$, состоящий из деревьев
 $\Gamma^1, (l_1^1, g^1), (l_1^{1,2}, f^{1,2}); \Gamma^2, (l_1^2, g^2); \Gamma^3, (l_1^{1,2,3}, f^{1,2,3}); \Gamma^4,$
соединенных ребрами $(l_1^1, l_1^2), (l_1^1, l_1^3), (l_1^1, l_1^4)$.

Таким образом, изложенное формальное представление позволяет для однозначно представляемых геометрических фигур со сколь угодно многочисленными множествами

параллельных сторон опеределить последовательность их обработки.

Заключение

В статье рассмотрено формальное представление алгоритма, реализующего цепочку операций последовательной обработки сторон многоугольника в двумерном пространстве с тремя степенями свободы. Иными словами, моделируется ситуация, когда на каждой операции обрабатывается только одна сторона и единожды используется сформированный комплект баз. Такой алгоритм применим для всех случаев расстановки размерных связей на детали для последовательной, параллельной и последовательно-параллельной схем расстановки структур. Схемы формирования комплектов баз и определения последовательности обработки для случаев параллельной расстановки координирующих размеров остались за рамками настоящей статьи.

Приведенная в статье формальная интерпретация задачи поиска технологических баз и синтеза последовательности обработки поверхностей детали на плоскости может служить основой для синтеза схем базирования в трехмерном пространстве с шестью степенями свободы, при проектировании технологий изготовления изделий и ремонта.

Представленные материалы могут быть положены в основу создания систем автоматизации и проектирования технологий судостроения и судоремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лелюхин В.Е., Игнатьев Ф.Ю., Дренин А.С., Колесникова О.В. Геометрия для описания реальных деталей машин // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 8. С. 95–99. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37126> (дата обращения: 21.04.2019).
2. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Цифровое информационное пространство управления производством морской техники // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 44. С. 45–49. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1559896461MITVOL44No2PART22019.pdf (дата обращения: 06.10.2019).
3. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машгиз, 1955. 515 с. <https://lib-bkm.ru/load/11-1-0-2717> (дата обращения: 06.10.2019).
4. Соколовский А.П. Основы технологии машиностроения. Т. 1. Л.: Машгиз, 1938. 680 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005125666> (дата обращения: 06.10.2019).
5. Agrawal Manindra, Kayal Neeraj, Saxena Nitin. PRIMES is in P. *Annals of Mathematics*. JSTOR. 2004(160);2:781–793. URL: <http://www.jstor.org/stable/3597229> – 06.10.2019.
6. Arvind Vikraman, Kurur Piyush P. Graph isomorphism is in SPP. *Information and Computation*. 2006(204);5:835–852. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ic.2006.02.002>
7. Chrystosolouris G. *Manufacturing systems: theory and practice*. Springer, 2006. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9780387256832> – 06.10.2019.
8. Gologlu C. A constraint-based operation sequencing for a knowledge-based process planning. *J. Intell Manuf.* 2004(15);4:463–470. URL: https://www.researchgate.net/publication/263259397_A_constraint-based_operation_sequencing_for_a_knowledge-based_process_planning_Intelligent_Manufacturing_Systems_Vision_for_the_Future_Guest_Editor_s_Ercan_Oztemel_Cemalettin_Kubat_and_Harun_Taskin – 05.10.2019.
9. Halevi G. *Industrial Management-Control and Profit, Lecture Notes in Management and Industrial Engineering 1*. Springer, 2014. DOI: https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03470-6_1
10. Halevi G. *Principles of process planning: a logical approach*. Springer Science & Business Media, 2012 399 p. URL: https://books.google.ru/books/about/ecciples_of_Process_Planning.html?id=OAHoCAAQBAJ&redir_esc=y – 06.10.2019.
11. Koenig D.T. *Computer-integrated manufacturing: theory and practice*. Taylor and Francis, Boca Raton. URL: <https://www.goodreads.com/book/show/14995141-computer-integrated-manufacturing> – 04.10.2019.
12. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Kuzminova T.A. Classification of Methods for Forming Surfaces When Machining Parts on Machine Tools. *International Science and Technology Conference EastConf*. (2019):1–5. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/EastConf.2019.8725366>. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8725366&isnumber=8725182> – 06.10.2019.

13. Lian K., Zhang C., Shao X., Gao L., Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm. August 2011, L., Springer-Verlag, Limited, 2011. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-011-3527-8> – 06.10.2019.
14. Lu C., Gao L., Li X., Pan Q., Wang Q. Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm. J. of Cleaner Production. 2017(144):228–238. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.011>
15. Mou J., Gao L., Li X., Pan Q., Mu J. Multi-objective inverse scheduling optimization of single-machine shop system with uncertain due-dates and processing times. The J. of Networks, Software Tools and Applications. 2017;1. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10586-016-0717-z>
16. Reid R. Dan, Sanders Nada R. Operations Management. John Wiley & Sons, 200, 457 p.
17. Tsitsiashvili G.Sh., Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Osipova M.A. Formal Design of Structure Process in Machining Parts. Applied Mathematical Sciences. 2017(11);32:1573–1580. URL: <http://www.m-hikari.com/ams/ams-2017/ams-29-32-2017/75167.html> – 06.10.2019.
18. Wang L., Adamson G., Holm M., Moore P. A review of function blocks for process planning and control of manufacturing equipment. J. of Manufacturing Systems. 2012(31);3:269–279. DOI:10.1016/j.jmsy.2012.02.004.
19. Wang L. Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing. CIRP J. of Manufacturing Science and Technology. 2013(6);4:263–273. DOI:10.1016/j.cirpj.2013.07.001
20. Weatherall A. Computer Integrated Manufacturing. From fundamental to implementation. Butterworths. 2nd ed. 1992, Nov. URL: <https://www.elsevier.com/books/computer-integrated-manufacturing/weatherall/978-0-7506-0811-4> – 06.10.2019.
21. Yusri Yusof, Kamran Latif. Survey on computer-aided process planning. London, Springer-Verlag, 2014, June. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-014-6073-3> – 06.10.2019.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2019. N 4/41

Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-7>

Tsitsiashvili G., Osipova M., Kolesnikova O., Lelyukhin V.

GURAMI TSITSIASHVILI, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor,

e-mail: guram@iam.dvo.ru

MARINA OSIPOVA, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor,

e-mail: mao1975@list.ru

Institute of Applied Mathematics FEB RAS

7, Radio St., Vladivostok, Russia, 690041

OLGA KOLESNIKOVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

e-mail: miis@mail.ru

VLADIMIR LELYUKHIN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

e-mail: lelv0@mail.ru

Department of Industrial Production Technologies

Far Eastern Federal University

8, Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Formal interpretation of technological bases task search and synthesis of surfaces detail processing sequence

Abstract: The synthesis of sets of bases and basing schemes and designing the sequence of surface treatment is one of the most important tasks of technology design. This problem can be formulated as determining the sequence of differently oriented positions of the part relative to the formative movements of the tool. The article presents a formal interpretation of a generalized algorithm for searching technological bases and syn-

thesis of a sequence of surface treatment of the part using a directional search algorithm based on a complex of dimensional bonds between surfaces in the space of the corresponding degrees of freedom. The synthesis is based on modeling the processing process using the algorithm of directional search of surfaces that actually exist now in the configuration of the part. Only these surfaces can be used as bases for its orientation when processing new (not yet existing) surfaces relative to the formative movements of the tool. In the mathematical interpretation of the model, a complex of connected acyclic graphs is used that displays dimensional relationships between the surfaces of the part for each of the degrees of freedom of the space in question. Conditions for finding solutions: 1) the presence of real-life surfaces for use as bases; 2) the presence of not yet treated surfaces; 3) the presence of dimensional bonds between real existing and machined surfaces, necessary and sufficient for the orientation of the machined surfaces; 4) single-stage (single-junction) processing of any surface of the part. The formal interpretation given in the article of the problem of searching for technological bases and the synthesis of the sequence of processing the surfaces of a part on a plane can serve as the basis for the synthesis of basing schemes in three-dimensional space with six degrees of freedom.

Keywords: digital shipbuilding, ship repair, technology development, formalization of development, basing of parts, surface machining.

REFERENCES

1. Lelyukhin V.E., Ignatiev F.Yu., Drenin A.S., Kolesnikova O.V. Geometry to describe the real details of machines. Modern high technology. 2018;8:95–99. URL: <http://top-technologies.ru/ru/-article/view?id=37126> – 21.04.2019.
2. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V. Digital information space for production management of marine equipment. Marine intellectual technology. 2019(2):44:45–49. URL: http://morintex.ru/wpcontent/files_mf/1559896461MITVOL44No2PART22019.pdf – 06.10.2019.
3. Sokolovsky A.P. Scientific foundations of engineering technology. M., Mashgiz, 1955, 515 p. <https://lib-bkm.ru/load/11-1-0-2717> – 06.10.2019.
4. Sokolovsky A.P. Fundamentals of engineering technology. V. 1. L., Mashgiz, 1938, 680 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005125666> – 06.10.2019.

For a complete list of references, see the previous page.