

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

2016

№ 1

Выходит 4 раза в год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Машиностроение и машиноведение (05.02.00)
- Информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00)
- Транспорт (05.22.00)
- Безопасность деятельности человека (05.26.00)
- Технология продовольственных продуктов (05.18.00)

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»; 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33

Главный редактор:

Братан С.М., д.т.н., профессор.

Зам. главного редактора:

Головин В.И., к.т.н., доцент.

Научный редактор:

Покинтелица Н.И., д.т.н., профессор.

Ответственный секретарь:

Левченко Е.А., к.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

1. Бохонский А.И., д.т.н., профессор,
2. Новоселов Ю.К., д.т.н., профессор,
3. Ветрогон А.А., к.т.н., доцент,
4. Годжаев З.А., д.т.н., профессор
5. Дуюн Т.А., д.т.н., профессор,
6. Каталинич Бранко, профессор
7. Копп В.Я., д.т.н., профессор,
8. Бакулина А.Н., к.т.н., доцент,
9. Мешков В.В., к.т.н., доцент,
10. Михайлов А.Н., д.т.н., профессор,
11. Неменко А.В., к.т.н., доцент,
12. Ничкова Л.А., к.т.н., доцент,
13. Пашков Е.В., д.т.н., профессор,
14. Севриков В.В., д.т.н., профессор,
15. Суслов А.Г., д.т.н., профессор,
16. Фалалеев А.П., д.т.н., профессор,
17. Филипович О.В., к.т.н., доцент,
18. Харченко А.О., к.т.н., профессор.

Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастоп. гос. ун-та; — Севастополь: СевГУ, 2016. — Вып. 1.— 88 с.

«Вестник современных технологий» — сборник научных трудов, в котором освещаются актуальные вопросы науки и техники. В статьях сборника приводятся результаты научных исследований в следующих областях: машиностроение и машиноведение; информатика, вычислительная техника и управление; транспорт; безопасность деятельности человека; технология продовольственных продуктов.

Настоящее научное издание адресовано научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам и студентам технических направлений подготовки, а также специалистам, интересующимся данной проблематикой.

СОДЕРЖАНИЕ

ОРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ	4
Т.А. АСКАЛОНОВА, С.Л. ЛЕОНОВ, А.А. СИТНИКОВ	
СИЛОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ФАСОННОМ ТОЧЕНИИ КАНАВОК КОЛЕЦ КОЛЛЕКТОРА	10
А.А. ВОЖЖОВ, В.И. ГОЛОВИН	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ	21
Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ, С.М. БРАТАН, А.О. ХАРЧЕНКО, Д.О. ВЛАДЕЦКИЙ	
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ СПАРК-ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ И АЛМАЗНО-ИСКРОВЫМ ШЛИФОВАНИЕМ	42
Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО	
БИНОМИАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	52
В.П. ДОЛГИН, И.В. ДОЛГИН	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «УСТРОЙСТВО ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ – УСТРОЙСТВО ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ»	58
В.Я. КОПП, М.В. ЗАМОРЕНОВ, А.А. СЕЛЬКИН, О.В. ФИЛИПОВИЧ	
РАЗВИТИЕ СТРАТЕГИИ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	66
А.Н. МИХАЙЛОВ, М.Г. ПЕТРОВ, А.Т. ЦЫРКИН	
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ИСПЫТАНИЮ ИМПЛАНТАТОВ МЕЖПОЗВОНКОВЫХ ДИСКОВ ЧЕЛОВЕКА	73
Е.В. ПАШКОВ, М.И. КАЛИНИН, В.И. ПАХАЛЮК, А.М. ПОЛЯКОВ	
ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ПОДАЧИ ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ РЕЗЦОМ	80
А.С. ЯМНИКОВ, А.О. ЧУПРИКОВ, А.И. ХАРЬКОВ	

CONTENT

THE GROUP TECHNOLOGIES IN THE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM	4
T.A. ASKALONOVA, S.L. LEONOV, A.A. SITNIKOV	
POWER INTERACTION WITH FINISH SHAPED GROOVING RINGS COLLECTOR	10
A.A. VOZHZHOV, V.I. GOLOVIN	
PROVISION OF GRINDING PROCESS DYNAMIC STABILITY BY REDUCING EXTERNAL DISTURBANCES ON BOARD OF FLOATING WORKSHOPS	21
E.A. VLADETSKA, S.M. BRATAN, A.O. KHARCHENKO, D.O. VLADETSKII	
ELECTROPHYSICAL ASPECT OF PRESSURE FORMING OF HIGHLY FUNCTIONAL NANOSTRUCTURED MATERIALS BY MEANS OF SPARK-PLASMA SINTERING AND DIAMOND-SPARK GRINDING	42
YU.G. GUTSALENKO	
BINOMIAL CORRECTION OF THE STOCHASTIC SYSTEMS	52
V.P. DOLGIN, I.V. DOLGIN	
INFORMATION RECEIVING «DEVICE INFORMATION PROCESSING –DEVICE SYSTEM OPERATION PROCESS SIMULATION»	58
V. KOPP, M. ZAMORYENOV, A. SELKIN, O. FILIPOVICH	
DEVELOPMENT OF THE SYNTHESIS STRATEGY OF FUNCTIONALLY ORIENTED MECHANICAL ENGINEERING TECHNOLOGIES	66
A.N. MIKHAYLOV, M.G. PETROV, A.T. TSyrKIN	
A SISTEMATIC APPROACH TO THE DESIGN, PRODUCTION AND TESTING OF HUMAN INTERVERTEBRAL DISK IMPLANTS	73
Y.V. PASHKOV, M.I. KALININ, V.I. PAKHALIUK, A.M. POLIAKOV	
MAXIMUM PERMISSIBLE FEED IN THE MULTIPASS THREAD CUTTING CUTTER	80
A. S. YAMNIKOV, A. O. CHUPRIKOV, A. I. KHARKOV	

УДК 658.52: 004

ОРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

Т.А. Аскалонова¹, С.Л. Леонов¹, А.А. Ситников¹¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Российская федерация

Получена 05.02.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

В статье раскрыты основные преимущества групповой технологии в условиях гибкой автоматизации многономенклатурного производства, изложены принципы формирования групповых комплектов инструментов при обработке деталей с общими конструктивно–технологическими признаками. Известно, что в условиях многономенклатурного производства при переходе к обработке детали другого наименования из группы, магазин инструментов заменяется, что приводит к снижению производительности систем. Предлагаемый механизм комплектования с помощью ЭВМ формирует не индивидуальные, а групповые комплекты инструментов для обработки деталей с общими конструктивно–технологическими признаками. Разработаны программное обеспечение и алгоритм для автоматизации этих процессов. Полученный в результате выполненной разработки набор групповых комплектов инструментов позволяет решать задачу очередности запуска деталей в производство, что значительно сокращает простой технологического оборудования и тем самым повышает эффективность использования гибких производственных систем.

Ключевые слова: групповая обработка, групповые комплекты инструментов, станки с ЧПУ.

THE GROUP TECHNOLOGIES IN THE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM

T.A. Askalonova¹, S.L. Leonov¹, A.A. Sitnikov¹¹Altai State Technical University, named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation

Received 05.02.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The article reveals the basic advantages of group technology in a flexible multiproduct manufacturing automation, set out the principles of formation of the group sets of tools for machining with the general structural and technological features. In multiproduct manufacturing conditions during the transition to other processing details of the group name, the tool storage is replaced, resulting in reduced system performance. The proposed mechanism of recruitment with the help of computers generates not individual, but group sets of tools for machining General constructive–technological features. Developed software and algorithm for automation of these processes. Obtained as a result of the development of a set group sets of tools allows you to solve the problem order run of parts in production, which significantly reduces simple process equipment and thereby improves the utilization of flexible manufacturing systems.

Keywords: batch processing, group sets of tools, CNC machines.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования гибких производственных систем (ГПС), качество изготавливаемой продукции в значительной мере зависит от организационной основы технологических процессов – групповой технологии, которая базируется на единстве конструктивно–технологических признаков деталей, применяемого технологического оборудования, приспособлений и режущих инструментов [4, 5, 6]. При использовании принципов групповой технологии сокращаются простои станков, снижаются материальные затраты на приспособления и инструмент, повышается производительность. Значительную роль при этом имеют формирование групп деталей и групповых комплектов инструментов для них. Принципам группирования деталей и организации маршрутов их обработки посвящено достаточно много работ, а механизм формирования групповых потоков инструментов освещён недостаточно [1,2,3]. Следует отметить, что в условиях многономенклатурного производства при переходе к обра-

ботке детали другого наименования из группы, магазин инструментов заменяется. В этом случае неизбежны простои станка, особенно значительные при обработке мелкими партиями, что приводит к снижению производительности ГПС. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается такой механизм формирования магазинокомплектов (МК) инструментов, который позволяет комплектовать с помощью ЭВМ не индивидуальные, а групповые МК, каждый из которых может обработать несколько различных деталей группы. Нами разработано программное обеспечение для автоматизации формирования групповых МК, алгоритм которого представлен на рисунке 1.

ФОРМИРОВАНИЕ МАГАЗИНОКОМПЛЕКТОВ

Решение этой задачи производится в несколько этапов. На первом осуществляется создание матрицы «деталь–инструмент», строки которой соответствуют деталям данной группы, а столбцы представляют массив инструментов, используемых для их обработки, и введения её в компьютер. Общее количество инструментов для обработки всей группы деталей, как правило, превышает объём инструментального магазина станка, а индивидуальные комплекты инструментов для обработки отдельной детали группы соответствуют количеству гнезд инструментального магазина.

Вторым этапом является автоматическая минимизация введённой матрицы: из неё удаляются строки с одинаковым комплектом инструментов. Это означает, что разные детали группы обрабатываются одним и тем же набором инструментов.

На третьем этапе осуществляется автоматическое генерирование МК инструментов. При этом формируются групповые МК, количество инструментов в которых не превышает объёма инструментального магазина станка. Как правило, каждый из них обеспечивает возможность обработки нескольких деталей данной группы, но нет ни одного, который бы позволил обработать все детали группы.

На четвёртом этапе производится поиск минимального количества МК, обеспечивающего «покрытие», то есть возможность обработки всей совокупности деталей группы. Эта задача решается перебором и решение её неоднозначно [14]. ЭВМ выдаёт набор группы МК, обеспечивающих «покрытие» деталей группы (рис. 2).

На пятом этапе производится выбор «покрытия» из этого набора. Этот этап не автоматизирован. Его выполнение зависит от плана–графика поступления деталей на станок (ГПС) и решается непосредственно инженером–технологом. Например, комплектом 5–7 можно обработать заданные детали группы в следующем порядке: 1,3,4,6,2,5. Именно в такой последовательности следует запускать детали в производство. Если имеется другой план запуска дета-

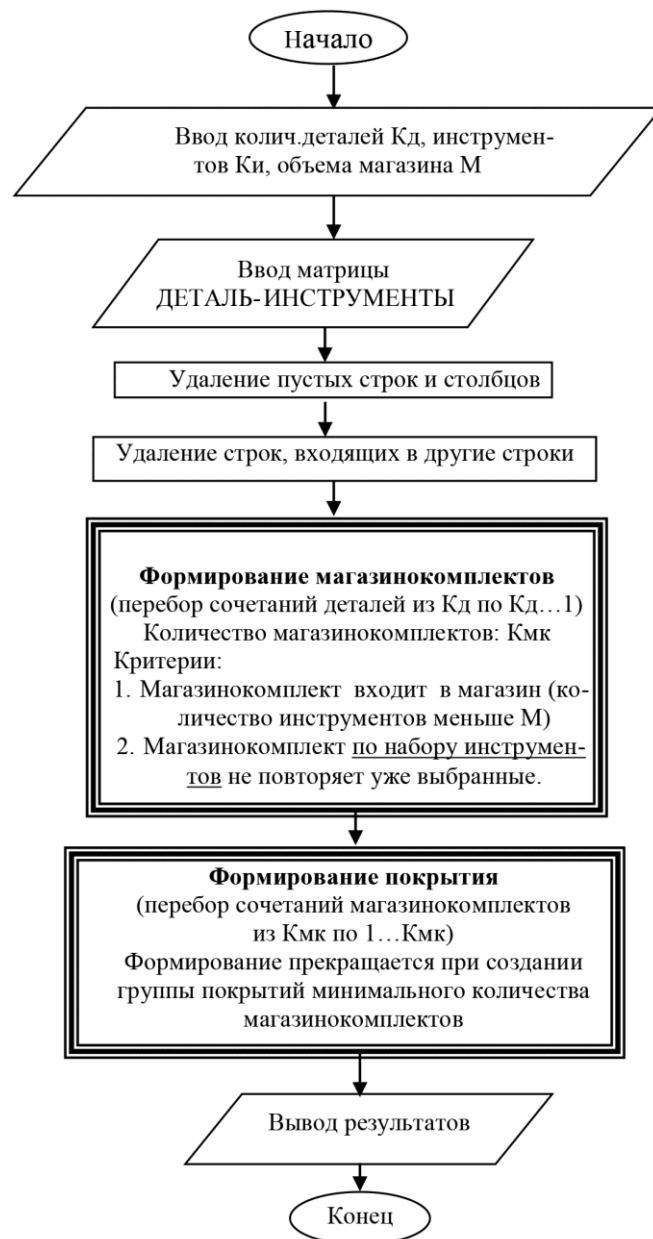


Рисунок 1 – Алгоритм формирования магазинокомплектов

лей, то выбор набора МК осуществляется в соответствии с ним. Например, план–график предписывает следующий порядок запуска: 1,2,4,3,5,6. Ищем набор МК, соответствующий такому порядку, это, например, 1–7. Выбранный набор перемещается к станку для размещения в инструментальном магазине. При обработке деталей в требуемой последовательности (1,2,4,3,5,6) в магазине станка размещается сначала МК 1 (обработка деталей 1,2,4), затем 7 (детали 3,5,6).

Формирование магазинокомплектов
Объем магазина = 10

Матрица «деталь–инструменты»:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
3	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0
4	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
5	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0

Магазинокомплект для деталей	1	2	4								
Инструменты	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	
1 Магазинокомплект для деталей								1	3	4	5
Инструменты	1	2	3	4	5	6	7		9	11	12
2 Магазинокомплект для деталей								2	3	4	5
Инструменты	1	2	4	5	6	7	9		10	11	12
3 Магазинокомплект для деталей								2	4	6	
Инструменты	2	4	5	6	7	8	9		10	11	12
4 Магазинокомплект для деталей								1	3	4	6
Инструменты	1	2	3	4	5	6	7		8	9	10
5 Магазинокомплект для деталей								3	5	6	
Инструменты	1	2	6	7	8	9		10	11	12	
6 Магазинокомплект для деталей								2	3	5	6
Инструменты	1	2	5	6	7	8	9		10	11	12
7 Магазинокомплект для деталей								4	5	6	
Инструменты	1	2	4	5	6	7	8		10	11	12
Всего 8 магазинокомплектов											

Всего 8 магазинокомплектов

Количество магазинокомплектов в покрытии:

Магазинокомплекты	5	7	образуют "покрытие"
Магазинокомплекты	2	7	образуют "покрытие"
Магазинокомплекты	1	7	образуют "покрытие"
Магазинокомплекты	1	6	образуют "покрытие"
Магазинокомплекты	3	5	образуют "покрытие"
Магазинокомплекты	2	4	образуют "покрытие"

Рисунок 2– Набор групповых магазинокомплектов, обеспечивающих «покрытие» деталей

Такой подход к организации групповой технологии обработки деталей в условиях гибкой автоматизации, включающий обязательный этап проектирования групповых МК, значительно сокращает простой технологического оборудования и тем самым повышает эффективность использования ГПС [13].

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ

На станках с ЧПУ инструменты размещаются, как правило, в гнездах магазина в порядке их использования по технологическому процессу обработки деталей. Однако за время цикла обработки один и тот же инструмент может подаваться в шпиндель станка несколько раз, то есть кратность его использования $K > 1$. Повторное обращение к одному и тому же инструменту вызывает дополнительные перемещения магазина. У некоторых станков, например, токарных, смена инструмента осуществляется непосредственно магазином и в процессе поиска адреса очередного инструмента деталь не обрабатывается, то есть время смены инструмента не перекрывается обработкой, что снижает коэффициент использования станка. Даже если поиск инструмента совмещен по времени с обработкой детали, все равно имеет смысл сокращать

путь и время перемещения магазина. Это позволит снизить вибрации, вызываемые перемещением, которые оказывают влияние на качество обработки. Таким образом, при кратности использования $K > 1$ размещение инструментов в гнездах магазина по технологическому маршруту не обеспечивает минимальную величину его перемещения за один цикл обработки, а, следовательно, минимальные затраты времени на поиск очередного инструмента.

Прямой перебор возможных вариантов размещения затруднителен из-за большого объема вычислений. Поэтому нами разработан алгоритм и программное обеспечение, которое позволяет решать задачу выбора только квазиоптимального размещения инструментов в магазинах, обеспечивающего минимальную величину его суммарного перемещения за один цикл обработки детали [15].

Исходными данными являются:

- число технологических переходов;
- количество гнезд в инструментальном магазине;
- число инструментов, используемых при обработке;
- массив инструментов по переходам.

Исходное расположение инструментов в магазине задается в порядке использования по технологическому процессу или с помощью генератора случайных чисел, после чего рассчи-

тывается суммарная величина перемещений магазина за один цикл обработки – критерий оптимальности. Затем с помощью случайных перестановок инструментов в магазине критерий оптимальности минимизируется.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанная методика и программное обеспечение использовано при обработке группы из четырех корпусных деталей: крышка правого редуктора электротали (2 шт); корпус правого редуктора; корпус левого редуктора. Обработка производится на вертикально–фрезерном станке с ЧПУ модели ГФ2171С5 [7–12].

Для их обработки применяется следующий набор инструментов:

- резец расточной для черновой обработки отверстия D52;
- резец расточной для черновой обработки отверстия D32;
- резец расточной для чистовой обработки отверстия D52;
- резец расточной для черновой обработки отверстия D32;
- резец для тонкого растачивания отверстия D52;
- резец для тонкого растачивания отверстия D32;
- резец канавочный для растачивания канавки D55;
- резец канавочный для растачивания канавки D33,8;
- фреза торцовая D80;
- зенкер D9,5;
- сверло D6,5;
- метчик M8;
- сверло D9;
- развертка D9,8;
- сверло D23;
- зенкер D6,5;
- сверло D18,5;
- зенкер D19;
- развертка D20;
- сверло D18;
- сверло D22;
- зенковка D28;
- зенковка D38;
- метчик M24;
- сверло D30;
- сверло D8;
- зенкер D8;
- сверло D9,5;
- сверло D26;
- зенковка D18;
- сверло D7.

Сформированные магазинокомплекты:

- магазинокомплект для деталей 1,2,3: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,20,21,22,23;
- магазинокомплект для деталей 1,4: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16.

В табл. 1 для магазинокомплекта 1 представлено исходное размещение инструментов и размещение после оптимизации. Из приведенных численных данных видно, что оптимизация позволила почти в 3 раза сократить ход магазина.

Таблица 1 – Результаты оптимизации

До оптимизации		После оптимизации	
№ ячейки	№ инструмента	№ ячейки	№ инструмента
1	1	1	1
2	0	2	0
3	4	3	6
4	8	4	7
5	12	5	8
6	10	6	9
7	13	7	13
8	0	8	0
9	16	9	0
10	2	10	2
11	7	11	3

До оптимизации		После оптимизации	
№ ячейки	№ инструмента	№ ячейки	№ инструмента
12	0	12	0
13	9	13	12
14	0	14	0
15	0	15	0
16	0	16	0
17	14	17	14
18	6	18	10
19	3	19	4
20	0	20	0
21	5	21	5
22	11	22	11
23	15	23	15
24	0	24	16
Ход магазина	555	Ход магазина	191

Выводы

Разработанная методика и программное обеспечение позволяет повысить эффективность групповой обработки деталей за счет формирования групповых магазинокомплектов и оптимизации размещения инструментов в инструментальном магазине станка. Необходимо отметить, что эффективность методики проявляется в том, что по крайней мере часть из инструментов используется несколько раз и формирования покрытий и оптимизация размещения в инструментальном магазине позволяет значительно сократить вспомогательное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наянзин Н.Г. Организация потоков инструментов в условиях ГПС [Текст] / Н.Г. Наянзин // Информационный науч.-техн. сб. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – Вып. 3. – С.7.
2. Даровских В.Д. Элементы системы ситуационного управления гибкого производства [Текст] / В.Д. Даровских // Техника машиностроения. – 2014. – Т 21. № 4 – С. 48–51.
3. Бржозовский Б.М. Управление системами и процессами.: [Учебник для вузов по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»] / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, А.Г. Схиртладзе // Старый Оскол : ТНТ, 2014. – 295, с.: ИЛ.
4. Технологические основы гибких производственных систем. / В. А. Медведев, В. П. Вороненко, В. Н. Брюханов // М.: Высшая школа, 2000, – 256 с.
5. Гибкое автоматическое производство. / Под ред. Майорова С.А. и Орловского Г.В. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983, – 376с.
6. Козырев Ю.Г. Гибкие производственные системы. Справочник: справочное издание / Ю. Г. Козырев. — М.: КНОРУС, 2015. — 364 с.
7. Металлорежущие системы машиностроительных производств. / под ред. Т.В.Таратынова. –М.: МГИУ, 2006. –488 с.
8. Кузнецов Ю.И. Оснастка для станков с ЧПУ: Справочник. / Ю.И. Кузнецов, А.Р. Маслов, А.М. Байков. –М.: Машиностроение, 1990. –512 с.
9. Балла О.М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. –СПб: Изд-во "Лань", 2015. –368 с.
10. Справочник конструктора-инструментальщика / под ред. В.И. Баранчикова. –М.: Машиностроение, – 997. –560 с.
11. Фадюшин И.Л. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС. / И.Л. Фадюшин, Я.А. Музыкант, А.И. Мещеряков, и др. –М.: Машиностроение, 1990. –272 с.
12. Режущий и вспомогательный инструмент // Обзор производственной программы KENNAMETAL HERTEL, 2008. –92 с.
13. Брук И.В. Гибкие производственные системы. Общие сведения. –М.: Машиностроение, 1990. –55 с.
14. Леонов С.Л. Анализ временных структур ГПС с целью оптимизации производительности. / С.Л. Леонов, Т.А. Аскалонова. // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты автоматизированных производств. –Барнаул: АПИ, 1991. С. 38–42.
15. Леонов С.Л., Аскалонова Т.А., Сыпачев И.С. Оптимизация длительности цикла работы гибких производственных систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, N 2014614119. 17.04.2014.

REFERENCES

1. Nayanzin NG Organization tools flows under FMS [Text] / NG Nayanzin // Information scientific and engineering. Sat. – M.: VNIITEMR, 1985. – Vol. 3. – P.7.
2. VD Darovskikh System elements of situational–governance flexible production [Text] / VD Darovskikh // Engineering Technology. – 2014 – T number 21. 4 – S. 48–51.
3. Brzhozovsky BM Management systems and processes.: [Textbook for high schools for direction–niju "Design and technological secu–chenie machine industry"] / BM Brzhozovsky, VV Martynov AG Shirt–ladze // Stary Oskol: TNT, 2014. – 295 p. : IL.
4. Technological fundamentals of flexible production–governmental systems. / VA Medvedev, VP–Voro Nenko, VN Bruchanov // M.: Higher School, 2000 – 256 p.
5. Flexible automatic production / Under red.Mayorova SA Orlovsky and GV – L.: Ma–engineering industry, Leningrad branch, 1983 – 376s.
6. Kozyrev YG Flexible manufacturing systems we have. Reference: reference book / G. Kozyrev. – M.: KNORUS, 2015. – 364 p.
7. Cutting Machine Builder system–tion industries. / Ed. T.V.Taratynova. –M.: MGIU, 2006. – 488 p.
8. Kuznetsov YI Accessories for CNC machines: A Handbook. / YI Kuznetsov, AR Maslov, AM Bike. –M.: Engineering, 1990. – 512 p.
9. Balla OM Processing of parts on CNC machines. SPb: Publishing house "Lan", 2015. – 368 p.
10. Reference Design–toolmaker / ed. V.I.Baranchikova. – M.: Mechanical engineering–ix, –997. To –560.
11. Fadyushin IL Tools for CNC machine tools, machining centers and FMS. / IL Fadyushin, JA Musician, AI Meshcheryakov, and others. –M.: Engineering, 1990. – 272 p.
12. Cutting and auxiliary tools // On–set production program KENNAMETAL HERTEL, 2008. – 92 p.
13. Brooke IV Flexible manufacturing systems. General information. –M.: Engineering, 1990. – 55 p.
14. Leonov SL Analysis of time GPS structures in order to optimize performance. / SL Leonov, T. Askalonova. // Finishing–finishing processing methods and tools AV–mated production. –Barnaul: API, 1991. S. 38–42.
15. Leonov SL, Askalonova TA IS Sypachev Optimization of cycle time operation gib–cal production systems. Certificate of state registration of the computer program, N 2014614119. 17.04.2014.

Рецензент: д.т.н. проф. Братан С.М.

УДК 621.941

СИЛОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ФАСОННОМ ТОЧЕНИИ КАНАВОК КОЛЕЦ КОЛЛЕКТОРА

А.А. Вожжов, В.И. Головин

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Получена 05.03.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

В статье предложена методика расчета сил резания в процессе выполнения финишной токарной обработки канавок коллектора щеточно-коллекторного узла слаботочных скользящих контактов, представленная в виде алгоритма. Представленная методика устанавливает закономерности изменения составляющих силы резания и их равнодействующей, от площади срезаемого слоя на этапе врезания при фасонном точении канавок контактных колец, с учетом факторов, формирующих величину силы резания в аналитическом виде в любой момент времени. Для конкретной детали проведено сравнение результатов расчетов по представленному алгоритму с результатами компьютерного моделирования и экспериментальными исследованиями данного процесса.

Ключевые слова: фасонное точение, сила резания, алгоритм, процесс, метод, сравнение.

POWER INTERACTION WITH FINISH SHAPED GROOVING RINGS COLLECTOR

A.A. Vozhzhov, V.I. Golovin

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Received 05.03.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The paper proposes a method for calculating cutting forces during the execution of the finish turning groove collector brush-collector unit low-current sliding contacts provided in the form of an algorithm. The presented method sets the patterns of change in the components of the cutting force and the resultant from the area of the shear layer at the stage when plunging structural shapes grooving slip rings, taking into account the factors shaping the value of cutting force in analytic form at any time. For specific details of the comparison of the calculation results by the presented algorithm to the results of computer simulation and experimental studies of the process.

Keywords: mold turning, cutting force, algorithm, process, method, comparison.

ВВЕДЕНИЕ

Теоретическое определение сил резания при точении канавок является сложной задачей. Сложность этой задачи состоит в том, что, при резании величина силы формируется в ходе самого процесса резания и зависит от большого количества факторов и параметров резания[1].

При обычном резании величина вектора скорости резания определяется окружной скоростью инструмента или заготовки V . Наложение подачи в радиальном направлении, при фасонном точении, приводит к постоянному изменению значения скорости с уменьшением диаметра заготовки, смещению вектора действительной скорости резания, при достаточно высокой скорости врезания. При врезании инструмента постоянно изменяются главный угол в плане, площади взаимодействия по передней и задней поверхности инструмента[5].

Экспериментальные методы определения силы резания чрезвычайно затруднены при решении поставленной задачи, т.к. производство испытательных образцов полностью соответствующих объекту исследования в данных условиях не представляется возможным, а использование эмпирических зависимостей при условиях резания, отличных от тех, в которых проводился эксперимент, приводит к значительным ошибкам.

Для более глубокого изучения данного процесса, математического моделирования процессов обработки, разработки и использования методик диагностики состояния режущего инструмента, остро стоит задача теоретического определения составляющих сил резания, так как

использование эмпирических зависимостей при условиях резания, отличных от тех, в которых проводился эксперимент, иногда приводит к значительным ошибкам.

Объектом исследования данной работы является финишная токарная обработка канавок коллектора щеточно-коллекторного узла слаботочных скользящих контактов, предназначенного для обеспечения в герметичном отсеке прибора надёжной коммутации электроцепей между соосно вращающимися узлами прибора, причём угол поворота узлов прибора друг относительно друга неограничен.

Целью данной работы является создание алгоритма определения сил резания при фасонном точении канавок в контактных кольцах коллектора, с учетом факторов формирующих величину сил резания в аналитическом виде в любой момент времени.

Рассматриваемые коллекторы ГК-11, ГК-12 имеют схожую конструкцию, в данной работе будет рассматриваться конструктивные особенности контактных колец. Коллекторы ГК-11 и ГК-12 отличаются только габаритными размерами и количеством контактных колец: 44 и 72 соответственно. Сами же контактные кольца имеют одинаковую конструкцию[4,5].

Данные типы коллекторов имеют малые габаритные размеры и сложную конструкцию. На рисунке 1 представлен общий вид рассматриваемой детали.

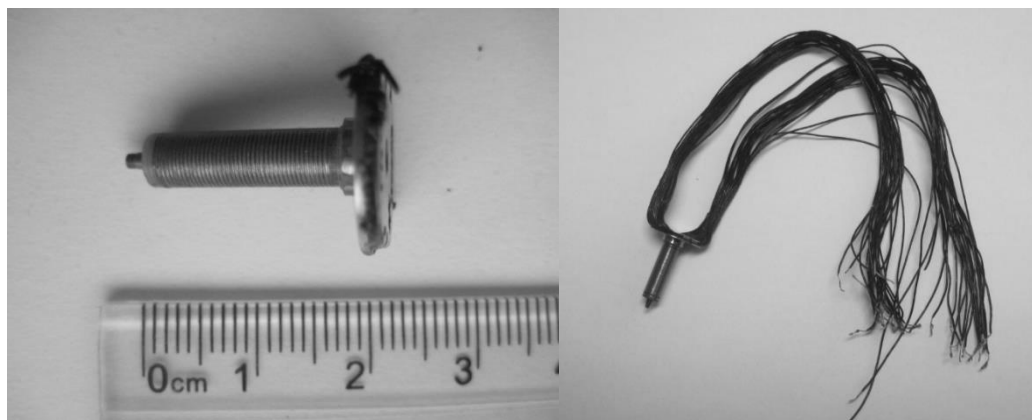


Рисунок 1 – Общий вид коллектора

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для определения составляющих силы резания при обработке кольцевых фасонных канавок контактных колец коллектора, воспользуемся расчетной схемой стружкообразования с единственной плоскостью сдвига (рис. 2), удовлетворяющей процессу фасонного точения канавок.

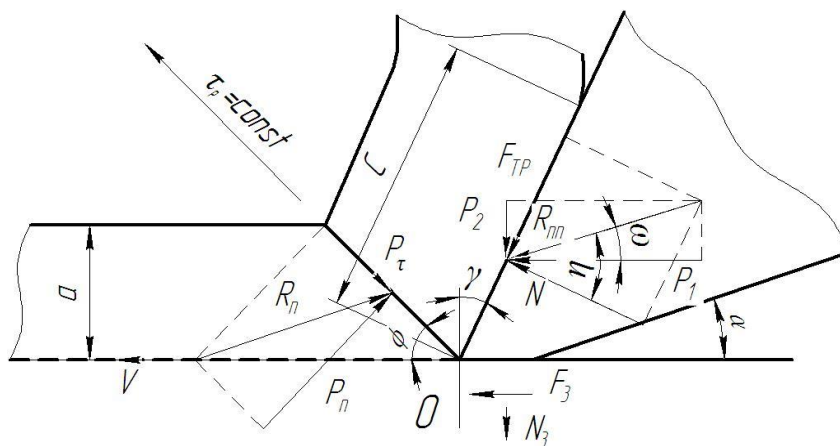


Рисунок 2 – Схема сил на передней поверхности инструмента при стружкообразовании с единственной плоскостью сдвига.

Характерной особенностью фасонного точения является то, что подача осуществляется только в радиальном направлении, следовательно, осевая составляющая силы резания $P_x = 0$.

Методика расчета представлена в виде алгоритма, определения технологических составляющих силы резания для процесса нарезания кольцевых канавок контактных колец коллекторов, приведена ниже в виде блоков [5].

Блок 1. Ввод исходных данных.

Основными исходными данными являются размерные характеристики срезаемого слоя, геометрические параметры режущего инструмента, физические свойства обрабатываемого материала.

К размерным характеристикам срезаемого слоя относятся: a – глубина резания, мм; F_{cp_i} – площадь срезаемого слоя i -го прохода, мм²; $\sum l_{xy_i}$ – проекция суммарной длины рабочих частей режущих кромок на плоскость перпендикулярную силе P_{z_i} ; $\sum l_{xz_i}$ – проекция суммарной длины рабочих частей режущих кромок на плоскость перпендикулярную силе P_{y_i} .

К геометрическим параметрам резца относятся: γ – передний угол резца; α – задний угол резца;

К физическо-механическим характеристикам обрабатываемого материала относятся: σ_B – предел прочности при растяжении; σ_T – предел текучести для остаточной деформации; δ – относительное удлинение при разрыве; ζ – усадка стружки по рекомендациям [12].

Материал заготовки: медно-цинковый сплав (латунь) марки Л70.

Материал инструмента: быстрорежущая сталь марки Р6М5К5.

Параметры геометрии инструмента назначаем, исходя из соображений обеспечения максимально усиленного режущего клина инструмента, по рекомендациям [10,11] принимаем $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 3^\circ$.

Расчет площади срезаемого слоя i -го прохода производим согласно рисунку 3.

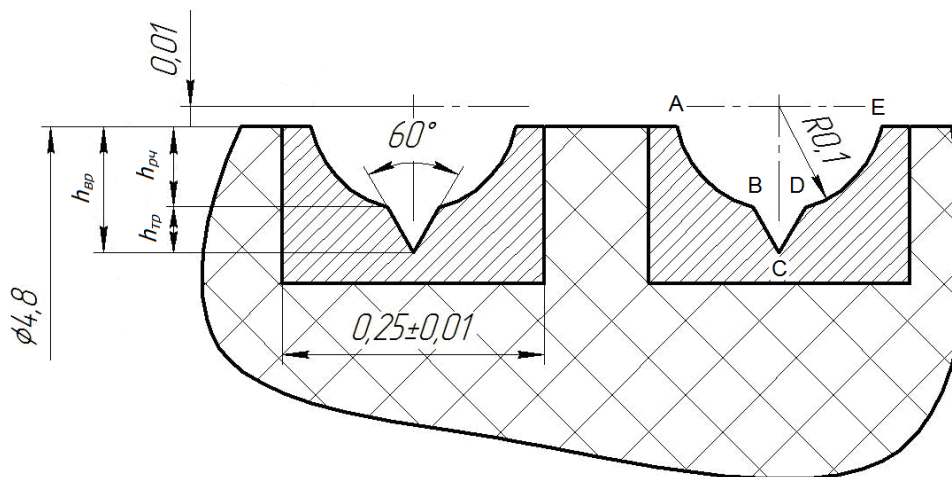


Рисунок 3 – Схема к расчету площади срезаемого слоя для процесса нарезания кольцевых канавок контактных колец коллекторов

Зная высоту треугольной части h_{mp} определим величину основания сегмента C_{nc} образованного дугой BD , который перекрывается треугольной частью, высоту перекрываемого сегмента h_{nc} , и L_{nc} – длину дуги BD .

$$C_{nc} = 2 \cdot h_{mp} \cdot \operatorname{tg} 30^\circ$$

$$h_{nc} = R - \sqrt{R^2 - \frac{C_{nc}^2}{4}}$$

$$L_{nc} = 2 \cdot \arcsin(2 \cdot R \cdot C_{nc}) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot R$$

В зависимости от текущей глубины врезания h_{epi} i – го слоя рассчитаем текущее значение F_{cp_i} (пока $h_{epi} \leq h_{mp}$)

$$F_{cp} = a \cdot \frac{4 \cdot h_{epi}}{\sqrt{3}};$$

$$(\text{при } h_{epi} > h_{mp}) F_{cp} = a \cdot \left(\frac{4 \cdot h_{mp}}{\sqrt{3}} - L_{nc} + L_{pч} \right),$$

где $L_{pч} = 2 \cdot R \cdot \left(\frac{180^\circ}{\pi} \arccos\left(\frac{R - h_{pч}}{R}\right) \right)$, длина части дуг AB и DE радиусной части ограниченных h_{epi} , согласно рисунка 3.

Блок 2. Определение касательных напряжений в условной плоскости сдвига и удельной силы трения на передней поверхности инструмента τ_p и $\overline{q_F}$.

Величина касательных напряжений в условной плоскости сдвига принята постоянной и зависящей от величины истинного предела прочности обрабатываемого материала при растяжении S_0

$$\tau_p = 0,7 S_0, \text{ МПа} \quad (1)$$

$$S_0 = \sigma_B (1 + \delta), \text{ МПа} \quad (2)$$

где σ_B – предел прочности обрабатываемого материала, Па;

δ – относительное удлинение.

Для определения удельной силы трения на передней поверхности $\overline{q_F}$ воспользуемся зависимостью [4]:

$$\overline{q_F} = 0,685 \tau_p, \frac{H}{\text{мм}^2} \quad (3)$$

Блок 3. Определение величины коэффициента трения μ .

Коэффициент трения μ в процессе резания определяет направление равнодействующей силы R_n на передней поверхности относительно этой поверхности, а в совокупности с передним углом γ – относительно направления движения инструмента.

На основании обработки результатов экспериментов при точении для подобного случая [6] была получена эмпирическая формула для определения коэффициента трения μ .

$$\mu = \frac{22500 \cdot \xi^{0,0015(90^\circ - \gamma)^{1,27}}}{(90^\circ - \gamma)^{2,46}}, \quad (4)$$

Блок 4. Определение величины относительного сдвига.

С физической точки зрения процесс резания является процессом глубокого пластического деформирования металла, превращаемого в стружку, следовательно, можно считать, что процесс резания – это процесс простого сдвига с некоторой долей сжатия.

Снятая стружка всегда деформирована. Степень деформации стружки характеризуется усадкой стружки ξ . Усадка стружки ξ – это отношение длины и толщины срезаемого объема металла к длине и толщине срезанной стружки соответственно. Значение усадки, всегда больше единицы. Однако в тех редких случаях, когда она равна единице, т. е. когда длина и толщина стружки равны длине и толщине срезаемого слоя, деформация металла, превращенного в стружку, будет иметь величину, исчисляемую сотнями процентов. Поэтому степень деформации металла, превращенного в стружку, нельзя выражать только величиной усадки. Наиболее правильно степень деформации выражать величиной относительного сдвига ε , при этом, другие процессы пластического деформирования (растяжение, сжатие, кручение) являются сдвиговыми и через относительный сдвиг можно решать вопросы эквивалентности деформаций в различных процессах.

Величина относительного сдвига ε при резании связана с усадкой стружки ξ и передним углом режущего инструмента γ .

$$\varepsilon = \frac{\xi^2 - 2\xi \sin \gamma + 1}{\xi \cos \gamma} \quad (5)$$

Блок 5. Определение углов трения η , сдвига ϕ и угла действия ω .

Угол η является углом трения стружки о переднюю грань и зависит от коэффициента трения μ .

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{F_{TP}}{N} = \mu, \quad (6)$$

где F_{TP} – сила трения стружки о переднюю поверхность; N – нормальная сила к поверхности резания.

Следовательно, по (6) рассчитаем угол трения.

$$\eta = \operatorname{arctg} \mu$$

Стружка образуется путем локализованной в ограниченном объеме сдвиговой деформацией, которая направлена под некоторым средним углом ϕ , к направлению движения режущего клина (рис. 5). Так как, для расчета принята схема съема стружки с единственной плоскостью сдвига, то получим следующую зависимость для угла сдвига.

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \Rightarrow \phi = \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \quad (7)$$

Угол ω между направлением равнодействующей на передней поверхности R_{nn} и вектором скорости V называется углом действия (рис.5). Как видно из рисунка $\omega + (90^\circ - \eta) + \gamma = 90^\circ$, откуда

$$\omega = \eta - \gamma \quad (8)$$

Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что увеличение угла действия ω всегда приводит к уменьшению угла сдвига ϕ . Поэтому сумма углов $\phi + \omega$ обычно мало изменяется. Эксперименты показали, что для практически применяемых условий резания можно использовать зависимость

$$\phi + \omega = C_{\omega\phi} \quad (9)$$

По данным [5] (на основе результатов проведенных экспериментов) величина $C_{\omega\phi}$ для группы медно-цинковых сплавов лежит в пределах $\phi + \omega = C_{\omega\phi} = 50^\circ \dots 52^\circ$.

Блок 6. Определение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента C .

Для определения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента используются зависимости, полученные с помощью теоретического анализа зоны стружкообразования.

Н.Г. Абуладзе, изучая микрофотографии сечений корней стружки и контактной поверхности стружки, установил, что независимо от длины передней поверхности, толщины среза, среды и скорости резания, линия, соединяющая точку D пластического контакта стружки на передней поверхности с точкой В пересечения обрабатываемой поверхности с наружной поверхностью стружки, составляет угол 45° со следом передней поверхности (направлением схода стружки) (рис. 3) [7]. На основании этого по схеме стружкообразования с единственной плоскостью сдвига имеем:

$$C = OA + AD = \frac{a}{\sin \phi} \cdot \sin(\phi - \gamma) + a \cdot \xi \quad (10)$$

При использовании формулы (3.7) получаем:

$$C = a \cdot [\xi \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma] \quad (11)$$

Результаты экспериментов и исследования ряда исследователей привели к получению зависимости определения длины контакта, с помощью которой можно получить наиболее близкие результаты расчета (и качественно, и количественно) к данным экспериментов [1,2].

$$C = a \cdot \xi^{0,1} \left[\xi \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{2}{\cos \gamma} \right], \text{ мм} \quad (12)$$

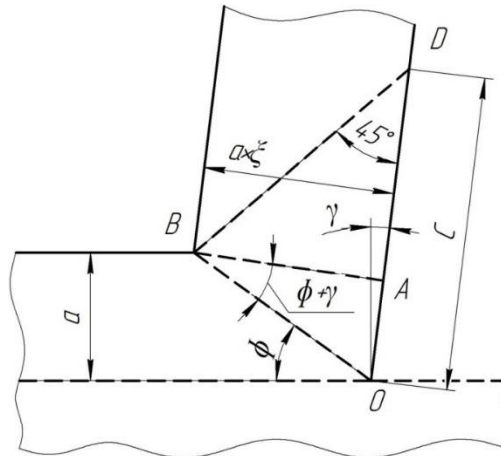


Рисунок 4. Упрощенная схема сливного стружкообразования для определения длины контакта C .

Блок 7. Расчет удельных сил на передней и задней поверхностях инструмента $C_{пл}$, $U_{пл}$, $C_{зп}$, $U_{зп}$.

Расчет удельных сил на передней поверхности инструмента основан на положении о равенстве удельных работ при резании и сжатии при условии равенства степеней пластической деформации. Данный подход был предложен А.М.Розенбергом и А.Н.Ереминым [11].

По их выводам удельная работа пластической деформации при сжатии представлена формулой:

$$A_W = (A_W)_{сж} = \frac{B}{1,5} \cdot \frac{\varepsilon_{сж}}{c+1}, \quad (13)$$

где B и C – постоянные для данного металла и температурно-скоростного режима деформирования; $\varepsilon_{сж}$ – относительный сдвиг при сжатии.

$$\varepsilon_{сж} = 1,5 \cdot \ln \frac{h_0}{h} \quad (3.14)$$

где h_0 – первоначальная высота сжимаемого образца, h – его высота в момент достижения деформации $\varepsilon = \varepsilon_{сж}$.

Удельная работа пластической деформации при резании выражается формулой:

$$A_W = \tau_p \cdot \varepsilon \quad (15)$$

Удельную работу пластической деформации при резании можно найти как разность между удельной работой, совершаемой силой P_1 , и удельной работой трения на передней поверхности инструмента:

$$A_{W_r} = A_{W_{P_1}} - A_{W_{F_{np}}} = \frac{P_1 \cdot V}{F_{cp} \cdot V} - A_{W_F} \quad (16)$$

где V – скорость резания.

В соответствии с картиной скоростей (рис.5) скорость трения параллельна передней поверхности и равна:

$$V_{F_{TP}} = V \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} = \frac{V}{\xi} \quad (17)$$

Сила трения определяется, как (рис.6):

$$F_{TP} = P_1 \cdot \frac{\sin \eta}{\cos \omega}. \quad (18)$$

Тогда A_{W_F} и A_{W_r} определяются по формулам (19) и (20):

$$A_{W_F} = \frac{P_1}{F_{cp}} \cdot \frac{\sin \eta \cdot \sin \varphi}{\cos \omega \cdot \cos(\varphi - \gamma)}, \quad (19)$$

$$A_{W_\tau} = \frac{P_1}{F_{cp}} \cdot \left(1 - \frac{\sin \eta}{\xi \cdot \cos \omega} \right) \quad (20)$$

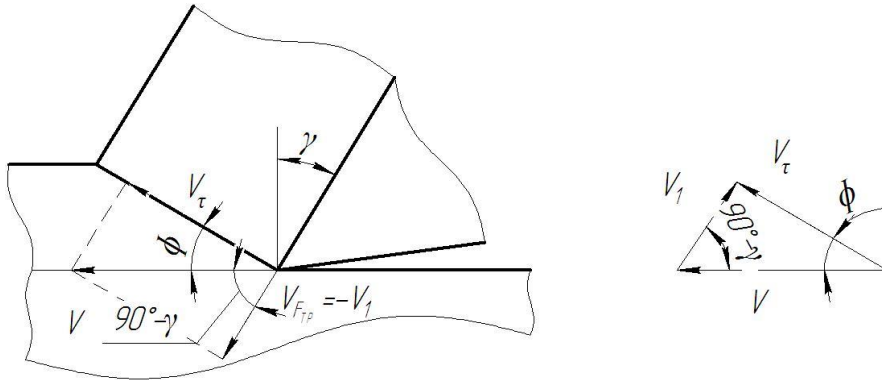


Рисунок 5. – Картина скоростей для сливного стружкообразования.

Приравнявая (3.15) и (3.20), имеем

$$\tau_p \cdot \varepsilon = \frac{P_1}{F_{cp}} \cdot \left(1 - \frac{\sin \eta}{\xi \cdot \cos \omega} \right) \quad (21)$$

откуда

$$P_1 = \tau_p \cdot F_{cp} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \frac{\sin \eta}{\xi \cdot \cos(\eta - \gamma)}} \quad (22)$$

при этом

$$\frac{\varepsilon}{1 - \frac{\sin \eta}{\xi \cdot \cos(\eta - \gamma)}} = \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\omega + \phi)} = K_1 \quad (23)$$

$$P_1 = \tau_p \cdot F_{cp} \cdot K_1 \quad (24)$$

$$F_{cp} = a \cdot b \quad (25)$$

где a – толщина стружки (глубина резания); b – ширина стружки.

Мощность процесса стружкообразования равна сумме мощностей процесса пластической деформации в зоне стружкообразования и процесса трения на передней поверхности инструмента.

$$P_1 \cdot V = P_\tau \cdot V_\tau + F_{TP} \cdot V_{TP}$$

Подставляя в это уравнение формулы для определения P_1 , P_τ , F_{TP} , V_τ , V_{TP} имеем

$$\tau_p \cdot a \cdot b \cdot K_1 \cdot V = \tau_p \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \phi} \cdot V \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)} + \bar{q}_F \cdot b \cdot C \cdot \frac{V}{\xi},$$

откуда

$$K_1 = \frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)} + \frac{\bar{q}_F}{\tau_p} \cdot \frac{C}{a \cdot \xi},$$

$$\frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)} = \operatorname{ctg} \phi + \operatorname{tg}(\phi - \gamma) = \varepsilon \text{ и } K_1 = \varepsilon + \frac{\bar{q}_F}{\tau_p} \cdot \frac{C}{a \cdot \xi} \quad (26)$$

На основании зависимостей (24), (26) удельные силы на передней поверхности можно определить так:

$$C_{III} = \tau_p \left(\varepsilon + \frac{\bar{q}_F}{\tau_p} \cdot \frac{C}{\xi \cdot a} \right) \frac{H}{\text{мм}^2}, \quad (27)$$

$$U_{III} = \tau_p \left(\varepsilon + \frac{\bar{q}_F}{\tau_p} \cdot \frac{C}{\xi \cdot a} \right) \cdot \text{tg} \omega \frac{H}{\text{мм}^2} \quad (28)$$

Сила P_1 действует на передней поверхности в направлении скорости резания. В этом же направлении на задней поверхности действует сила трения F_3 . Если нет износа по задней поверхности, сила F_3 мала, но обязательно существует, т.к. обязательно есть упругопластический контакт расположенного у режущей кромки участка задней поверхности с поверхностью резания. Вызван он тем, что поверхность резания, упруго деформированная силами от передней поверхности, упруго восстанавливается после прохода режущей кромки и, восстанавливаясь, контактирует с участком задней поверхности.

При больших толщинах снимаемой стружки ($a \geq 0,15 \text{ мм}$), силу F_3 можно не учитывать, но при работе инструментов, которые снимают стружку толщиной, измеряемую сотыми долями миллиметра, она принимает довольно большие значения и может превысить величину силы P_1 .

Для определения удельных сил на задней поверхности [13,6] предлагается использовать расчетную схему стружкообразования с единственной криволинейной поверхностью сдвига и условные силы на задней поверхности, которые включают в себя силы, действующие на округление режущей кромки и силы, действующие непосредственно на площадку износа.

$$F_3 = (1,5 \cdot \tau_p \cdot \varepsilon \cdot \rho + \mu_1 \cdot \sigma_T \cdot (h_3 + \delta_0)) \cdot \sum l_{xy}, \quad (29)$$

$$N_3 = (1,5 \cdot \tau_p \cdot \rho \cdot (3,17 \varepsilon + 1) \cdot \text{tg} \omega + \sigma_T \cdot (h_3 + \delta_0)) \cdot \sum l_{xz}, \quad (30)$$

где ρ – радиус округления режущей кромки; μ_1 – коэффициент трения металла о заднюю поверхность инструмента; h_3 – площадка износа на задней поверхности; δ_0 – ширина упругого контакта задней поверхности инструмента с обработанной поверхностью металла.

На основании формул (29), (30) удельные силы на задней поверхности можно определить так:

$$C_{3II} = 1,5 \cdot \tau_p \cdot \varepsilon \cdot \rho + \mu_1 \cdot \sigma_T \cdot (h_3 + \delta_0) \frac{H}{\text{мм}^2}, \quad (31)$$

$$U_{3II} = 1,5 \cdot \tau_p \cdot \rho \cdot (3,17 \varepsilon + 1) \cdot \text{tg} \omega + \sigma_T \cdot (h_3 + \delta_0) \frac{H}{\text{мм}^2} \quad (32)$$

Для расчета удельных сил на задней поверхности необходимо знать значения параметров ρ , h_3 , δ_0 , μ_1 .

Радиус округления режущей кромки зависит от качества обработки режущего инструмента. В расчете принимаем, что резец имеет максимально точную геометрию, которая может быть получена, для столь малых размеров инструмента на особовысокоточных оптикошлифовальных станках.

Принимаем радиус (рабочего состояния) округления режущей кромки $\rho = 0,0015 \text{ мм}$.

Форма режущего клина, полученная заточкой, сохраняется лишь в первые мгновения работы инструмента: почти сразу же образуется ленточка износа по задней поверхности (так называемый начальный износ в процессе приработки) h_3 , который сначала стабилизируется, а затем по мере работы инструмента растет [14].

Значение величины износа h_3 для каждого прохода инструмента является сложной задачей. При увеличении h_3 растет удельная сила на задней поверхности, следовательно, возрастают и составляющие силы резания, пока не достигнут какого-то критического значения. Величину h_3 в данной работе можно принять равной величине износа в начальный момент времени.

В работе [1] рекомендуется в качестве начального износа принять значение $h_3 = 0,001 \text{ мм}$.

За фаской износа располагается контакт, вызванный упругим восстановлением поверхности резания δ_0 . Величина δ_0 из расчетов, проведенных в [15] для инструмента из быстрорежущей стали составляет $\delta_0 \approx 0,05$ мм.

Коэффициент трения по задней поверхности μ_1 , близкий по своему значению коэффициенту трения в паре «материал инструмента – обрабатываемый материал». Для пары сталь-латунь он составляет $\mu_1 = 0,35$ [8].

Блок 8. Определение технологических составляющих силы резания P_{z_i} , P_{y_i} .

По зависимости, предложенной в [11], составляющие силы резания рассчитываются, как:

$$P_{z_i} = C_{III} \cdot F_{CP_i} + C_{3II} \sum l_{xy_i} \quad (33)$$

$$P_{y_i} = U_{III} \cdot F_{CP_i} \cdot \cos \varphi_{np_i} + U_{3II} \sum l_{xz_i} \quad (34)$$

где φ_{np_i} – приведенный угол в плане инструмента для i -го прохода согласно рисунку 3 найдем

используя условие, (пока $h_{epi} \leq h_{mp}$) $\varphi_{np_i} = 60^\circ$; (при $h_{epi} > h_{mp}$) $\varphi_{np_i} = \arctg \frac{2 \cdot h_{epi}}{C_{pchi}}$, где

$$C_{pchi} = 2 \cdot \sqrt{h_{pchi} \cdot (2R - h_{pchi})}, h_{pchi} = h_{epi} - h_{mp} + h_{nc}.$$

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе разработанного алгоритма был произведен расчет, результаты которого представлены в сравнении с результатами моделирования полученными методом конечных элементов.

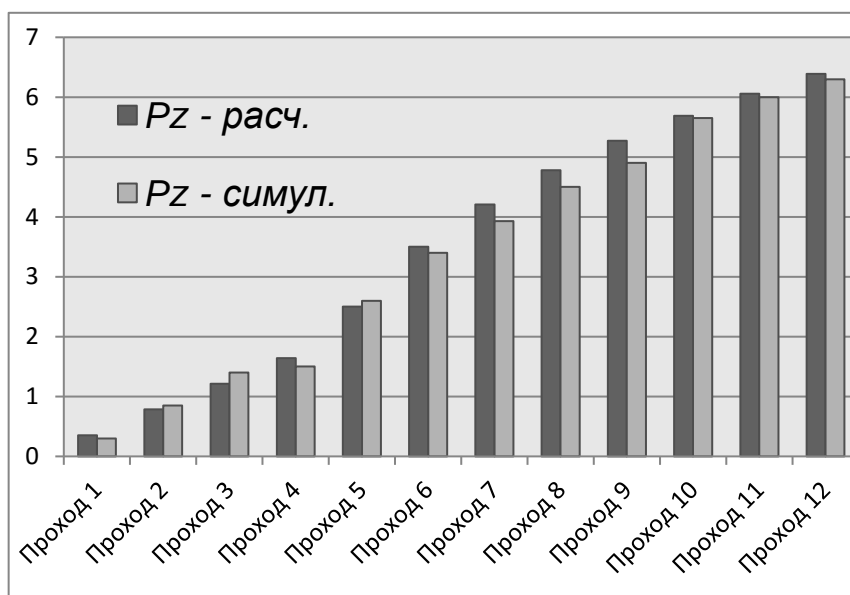
Достоверность также проверена путем сравнения при проведении ряда экспериментов.

Значения составляющих силы резания, полученных при симуляции процесса и при расчете представлены в таблице.

Таблица 1 – Силы резания, полученные при симуляции и при расчете

№ прохода	Сила P_{z_i} , Н		Сила P_{y_i} , Н	
	расчет	симуляция	расчет	симуляция
1	0,354	0,3	0,276	0,23
2	0,783	0,85	0,567	0,45
3	1,212	1,4	0,87	0,85
4	1,6	1,5	1,15	1,16
5	2,5	2,6	2,19	2,14
6	3,5	3,4	3,12	3,1
7	4,21	3,93	3,75	3,4
8	4,78	4,5	4,2	3,9
9	5,27	4,9	4,54	4,4
10	5,69	5,65	4,79	4,6
11	6,06	6,0	4,985	4,9
12	6,39	6,3	5,1	5

На полученной гистограмме (рис. 6) видно, что значения составляющих сил резания, полученные при резании и симуляции близки. Это свидетельствует о том, что эти значения могут соответствовать силам резания возникающим при реальной обработке.

Рисунок 6 – Гистограмма значений P_z на 10-м проходе

Дальнейшее совершенствование представленной модели будет возможно после обработки результатов экспериментов (рис. 7). Результаты проведенных исследований будут представлены в последующих работах.

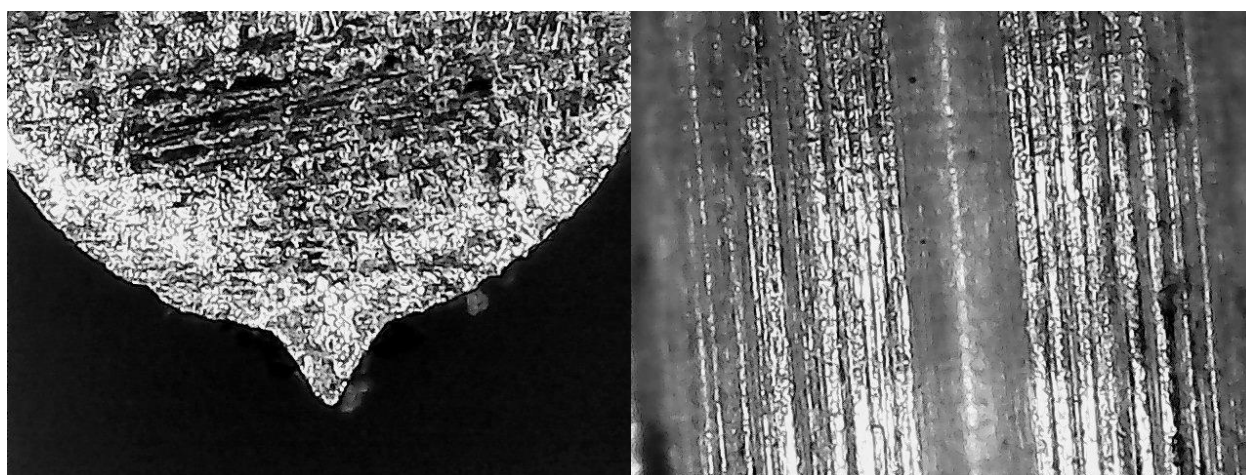


Рисунок 7 – Профиль используемого фасонного резца и изготовленной канавки контактного кольца коллектора в процессе экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете силы резания // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар.науч.-техн.сб. – Харьков:НТУ «ХП», 2008. – Вып.74. –С.31-56.
2. Внуков Ю.Н. Износостойкость инструментов из быстрорежущей стали/ Ю.Н Внуков. Запорожье, 2011. 412с.
3. Виджесундара Пемсири. Влияние сдвига фаз колебаний по отдельным координатам упругой системы на износ токарных проходных резцов. Дисс.канд.техн.наук.-М.: 1989.-208с.
4. Вожжов А.А Динамическое поведение прогиба стенки конической тонкостенной детали при точении с пилообразными колебаниями резца в радиальном направлении // Оптимизация производственных процессов: Изд-во СевНТУ 2011 №13 С.23-29.
5. Вожжов А.А. Анализ особенностей расчета сил резания при точении с пилообразными колебаниями резца в радиальном направлении // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 139/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. — Севастополь, 2013. С. 45-52
6. Лоладзе Т.Н. Стружкообразование при резании металлов. – М.:Машгиз,1952. – 199с.

7. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. — Л.: Машиностроение, 1970. — 320 с.
8. Пашков Е.В. Технологические основы обработки точением тонкостенных цилиндрических деталей: учеб. пособие / Е.В. Пашков. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. — 425 с.
9. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. — М.: машиностроение, 1969. — 152с.
10. Розенберг Ю.А. Алгоритм расчета составляющих силы резания при токарной обработке // СТИН. — 2003.-№5. — С. 18-21.
11. Розенберг Ю.А. Резание материалов. — Курган: Изд- во ОАО «Полиграфический комбинат», 2007. — 294с
12. Развитие науки о резании металлов/ Под ред. Н.Н.Зорева. — М: Машиностроение, 1967. — 416 с.
13. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. — М.: Машиностроение, 1969. — 152 с.
14. Зорев Н.Н. Расчет проекций силы резания. — М.: Машгиз, 1958. — 56 с.
15. Абуладзе Н.Г. Характер и длина пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента/ Обработка жаропрочных и титановых сплавов: труды всесоюзной межвузовской конф. — Куйбышев: Изд- во КуАИ, 1962. — С68– 78.

REFERENCES

1. Vnukov YN, Sarzhinskaya AG Analysis of the features of different approaches to the analytical calculation of the cutting force // Cutting Tool and in technological systems: Mezhdunar.nauch.-tehn.sb. — Kharkov: NTU "HPI", 2008. — Vyp.74. — P.31-56.
2. Vnukov YN The wear resistance of tools made of high speed steel / YN Vnukov. Zaporozhye, 2011. — 412 p.
3. Vidzhesundara Pemsiri. Influence of shear oscillation phases of individual coordinates of the elastic system on the wear bushing turning cutters. Diss.kand.tehn.nauk. M.: 1989.-208 p.
4. Vozzhov AA dynamic behavior of thin-walled parts of the conical wall deflection at turning a sawtooth oscillations cutter radially // Process optimization: Izd SevNTU 2011 №13 P.23-29.
5. Vozzhov AA Analysis of the features of the calculation of cutting forces in turning a sawtooth oscillations cutter radially // News SevNTU: ST. Sciences. pr. Vip. 139/2013. Seriya: Mashinopriladobuduvannya i transport. — Sevastopol, 2013. pp 45-52
6. Loladze TN Chip formation in metal cutting. — М.: Mashgiz 1952. — 199 p.
7. Matalin AA Precision machining and design processes. — L.: Engineering, 1970. — 320 p.
8. Pashkov EV Technological bases of processing of turning thin-walled cylindrical parts: studies. Manual / EV Pashkov. — Sevastopol: Izd SevNTU, 2000. — 425 p.
9. Poletika MF The contact surfaces of the load on the cutting tool. — М.: Engineering, 1969. — 152 p.
10. Rosenberg JA The algorithm for calculating the components of the cutting force in turning // STIN. — 2003.— №5. — P. 18-21.
11. Rosenberg JA Cutting materials. — Kurgan: Publishing House of "Printing Plant", 2007. — 294 p.
12. The development of the science of metal cutting /Ed. N.N.Zoreva. — М: Mechanical engineering, 1967. — 416 p.
13. Poletika MF The contact surfaces of the load on the cutting tool. — М.: Engineering, 1969. — 152 p.
14. Zorev H.H. Calculation of the projections of the cutting force. — М.: Mashgiz, 1958. — 56 p.
15. Abuladze NG The nature and length of the plastic contact chip with a front surface of the tool / machinability of heat-resistant and titanium alloys: works-Union Interuniversity Conf. — Kuibyshev: Publishing House of Kuai, 1962. — P. 68-78.

Рецензент: д.т.н. профессор Михайлов А.Н.

УДК 621.9-219.1-752

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ

Е.А. Владецкая¹, С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, Д.О. Владецкий²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация² Филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова» г. Севастополь, Российская федерация

Получена 05.03.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

Приведены результаты теоретических и практических работ на основе системного анализа процесса шлифовальной обработки, моделирования динамической системы и ее оценок, исследования влияния на динамику станка морского волнения, в качестве внешних сил действующего на плавучее основание мастерской; оптимизации структуры виброзащитной системы станка, способствующей снижению уровня внешних воздействий на него при работе. Предложены конструктивные решения по обеспечению эффективного управления демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, а также опора с активной виброизоляцией. Выполненные исследования подтверждают высокую эффективность динамической стабилизации шлифовальной обработки посредством применения новых виброизолирующих устройств и возможность их широкого применения в производственных условиях, в частности на плавучих мастерских.

Ключевые слова: плавучая мастерская, процесс шлифовальной обработки, динамическая система, автоматическое управление демпфированием.

PROVISION OF GRINDING PROCESS DYNAMIC STABILITY BY REDUCING EXTERNAL DISTURBANCES ON BOARD OF FLOATING WORKSHOPS

Е.А. Vladetska¹, S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, D.O. Vladetskii²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² Sevastopol branch of FSEI HVT «Admiral Ushakov Maritime University», Sevastopol, Russian Federation

Received 05.03.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The results of theoretical and practical work on the basis of system analysis of grinding process, simulation of dynamic systems and its evaluation, studies of the effect of sea waves on grinding machine dynamics; optimization of structure of vibration isolating system of the machine, which reduces the level of external influences on him during operation. The constructive solutions for the effective management of damping of vibration isolating mount under external influences, as well as mount with active vibration isolation. The studies confirm the high efficiency of dynamic stabilization of the grinding processing by the application of the new anti-vibration devices and the possibility of their wide application in a production environment, in particular on floating workshops.

Keywords: floating workshop, grinding processing quality, dynamic system, automatic damping control.

ВВЕДЕНИЕ

При ремонте морских и речных транспортных средств широкое применение находят такие передвижные механические комплексы, как плавучие мастерские, на палубах которых размещены различные участки, в том числе и механообрабатывающие, включающие практически все виды станочного оборудования. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных действием различных источников, приводящее к снижению точности и чистоты обработки, а также и к другим нарушениям технологических процессов.

Для повышения качества обработки прецизионные станки должны быть защищены от вибраций соседних установок. При монтаже некоторых станков (шлифовальных, точных то-

карно-винторезных, балансировочных и т.п.) на фундаментах первой группы, когда роль собственно фундамента выполняет станина, ряд заводов практикует в качестве антивибрационного мероприятия установку станков на виброизолирующих опорах. При недостаточно тщательном подборе или при изменении режима работы станка упругие элементы могут вызывать даже усиление вибраций.

Однако, в тех случаях, когда требуется особо малая волнистость и шероховатость обработанной поверхности или когда источник большой вибрации находится поблизости, то вышеуказанный способ виброизоляции является недостаточным.

Повышение качества обработки деталей в условиях плавучей ремонтной мастерской (ПРМ) и плавучей мастерской (ПМ) непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников (рис. 1), в том числе и от внешней среды – волнений водной поверхности.

Как правило, на палубах плавучих мастерских (ПРМ и ПМ) фиксация станков обеспечивается фундаментом, который не обеспечивает достаточного уровня виброизоляции вследствие значительных колебательных воздействий как от внешнего оборудования, так и от внешней среды через плавучее основание и поверхность палубы.



а)



б)

Рисунок 1 – Общий вид плавучей ремонтной мастерской (а) и пример установки ее оборудования (б)

Целью данной статьи является поиск путей обеспечения динамической стабилизации шлифовальной обработки на основе системного анализа процесса, моделирования и оценок, исследования влияния на динамику станка морского волнения, в качестве внешних сил действующего на плавучее основание плавучей мастерской, оптимизации структуры виброзащитной системы станка, способствующей снижению уровня внешних воздействий на него при работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционные виброизолирующие опоры металлорежущих станков [1, 2], выполненные на основе виброизоляторов, различающихся упруго-демпфирующими характеристиками, различным сочетанием виброизолирующих и ударно-защитных свойств, долговечностью, способностью функционировать в тех или иных климатических условиях, а также чисто конструктивными особенностями, не могут быть использованы на плавучих мастерских в условиях качки плавучего основания и горизонтальных смещений под ее воздействием.

Так как технологический процесс шлифования (в частности, чистового) является сложным многокомпонентным объектом, на который оказывает влияние большое количество изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий, то необходимо рассмотреть его как систему.

Методами системного анализа можно провести декомпозицию воздействий со стороны окружающей среды на технологический процесс: а) измеряемая и управляемая часть – вектор управления $U(\tau)$; б) измеряемая, но неуправляемая часть – вектор входных переменных $X(\tau)$; в) неизмеряемая (и, тем более, неуправляемая часть) – вектор $\Omega(\tau)$.

Внутри каждого из указанных векторов можно выделить компоненты, характеризующие факторы, воздействующие на технологический процесс (рис. 2).

Состояние технологического процесса отображается вектором $Z(\tau)$. При этом доступная измерению часть $Z(\tau)$ является вектором выходных переменных $Y(\tau)$. Часть выходных переменных $Y(\tau)$ определяет единичные показатели качества $y_k(\tau)$, по которым целесообразно вести оценку стабильности технологического процесса.

Согласно общепринятым представлениям, под стабильностью понимают свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготовления продукции в заданных пределах в течение некоторого промежуточного времени.

Следовательно,

$$|y_k(\tau_0) - y_k(\tau)| \leq \varepsilon_k \text{ при } \tau \in (\tau_0 \quad \tau_f), \quad (1)$$

где ε_k – заданный предел изменения k -го показателя качества, $(\tau_0 \quad \tau_f)$ – заданный интервал времени, в течение которого должны сохраняться показатели качества. Эти показатели должны находиться в пределах заданного поля допуска

$$y_{k \min} \leq y_k(\tau) \leq y_{k \max}.$$

Неравенство (1) гарантированно выполняется при условии

$$\left| \frac{dy_k}{d\tau} \right| \leq \delta_k, \quad (2)$$

где $\delta_k = \frac{\varepsilon_k}{\tau_f - \tau_0}$ – ограничение по скорости изменения параметра y_k .

Причинами, вызывающими изменение y_k являются внешние воздействия на технологический процесс, т.е. векторов воздействий $U(\tau)$, $X(\tau)$, $\Omega(\tau)$ и начальные условия состояния $Z(\tau_0)$. В силу того, что $\Omega(\tau)$ является неизмеряемым, его компоненты могут считаться случайными функциями, результат воздействия которых приводит к случайным отклонениям от номинальных значений y_k и, следовательно, появлению элементов случайности в показателях качества.

В соответствии с ГОСТ 15895-77, для такого случая критерием стабильности служит среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра σ_{y_k} , т.е.

$$\sigma_{y_k} \leq \sigma_{y_{k \max}} \quad (3)$$

Обеспечение стабильности соответствующих показателей производится за счет выбора компонент вектора $U(\tau)$ (рис. 2).

Считается, что рациональными являются такие параметры управления $U(\tau)$, которые обеспечивают положение центра рассеивания y_k внутри поля допуска ($y_{k \min}$, $y_{k \max}$) на таком уровне y_{k0} , который минимизирует вероятность появления бракованных деталей. Обычно указанную задачу решают путем соответствующей фиксированной настройки станка $U^*_0(\tau_0)$, обеспечивавшей заданные параметры в течение максимально достижимого интервала времени.

Все вышеперечисленные алгоритмы не обеспечивают одновременную стабилизацию параметров качества в условиях случайных возмущений $\Omega(\tau)$, что недопустимо для операций чистового шлифования, для которых допуски ε_k являются малыми величинами.



Рисунок 2 – Системный анализ технологического

На операциях чистового шлифования обработка заготовок также выполняется в условиях непостоянства параметров технологической системы обработки и окружающей среды. Изменяется состояние рабочей поверхности абразивного инструмента, состав и свойства СОТС, параметры жесткости технологической системы, температура окружающей среды и т.д. Изменение одних параметров протекает за период обработки одной детали, других – в течение смены, третьих – в течение более длительного периода.

Для таких условий $Z(\tau) = \text{var}$, вектор управления $U^*(\tau)$ должен выбираться с учетом изменения $Z(\tau)$, и для каждой детали m необходимо подбирать новое управление $U_m^*(\tau)$.

Применение традиционных методов и средств для обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при шлифовании практически исчерпало свои возможности и требует детализированного изучения этих технологических операций как системы, отражающей взаимодействие состояний $Z(\tau)$.

Необходимое качество обработки изделий в настоящее время чаще всего обеспечивается не адекватным математическим описанием объекта и управлением, а избыточными затратами технологических ресурсов (времени обработки, применением дополнительных доводочных процедур, нерациональным расходом материала круга и т.п.).

Для повышения эффективности операций чистового шлифования пытаются применять различного рода автоматические системы. При этом в зависимости от уровня априорной и рабочей информации возможно несколько ситуаций:

- состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы можно пренебречь;
- состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя;
- состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы можно пренебречь;
- состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя.

Решение задачи об оценке неизменяемых параметров может быть обеспечено применением подхода, основанного на применении схем со «стохастическим наблюдателем», где оценка неизменяемых компонент производится по результатам моделирования динамики технологической системы, с входным сигналом, соответствующим сигналу управления, поступающему на реальный динамический объект – технологическую систему. Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиус-векторов шлифовального круга и заготовки необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный

процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у текущего отклонения радиус-вектора шлифовального круга. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра. Принцип получения случайного процесса с заданными параметрами – спектральной характеристикой (корреляционной функцией) иллюстрируется схемой (рис. 3).

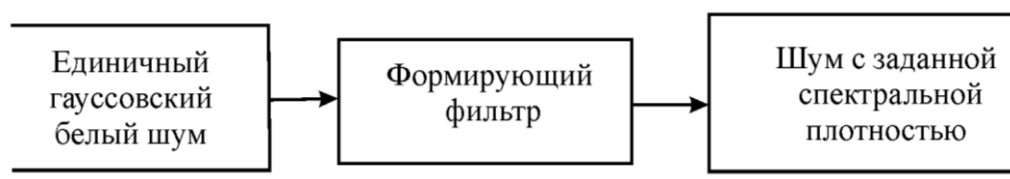


Рисунок 3 – Схема получения шума с заданными параметрами с помощью формирующего фильтра

Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компоненты динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку в процессе шлифования. Для настроек формирующего фильтра используются результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга, так называемая схема «динамического наблюдателя».

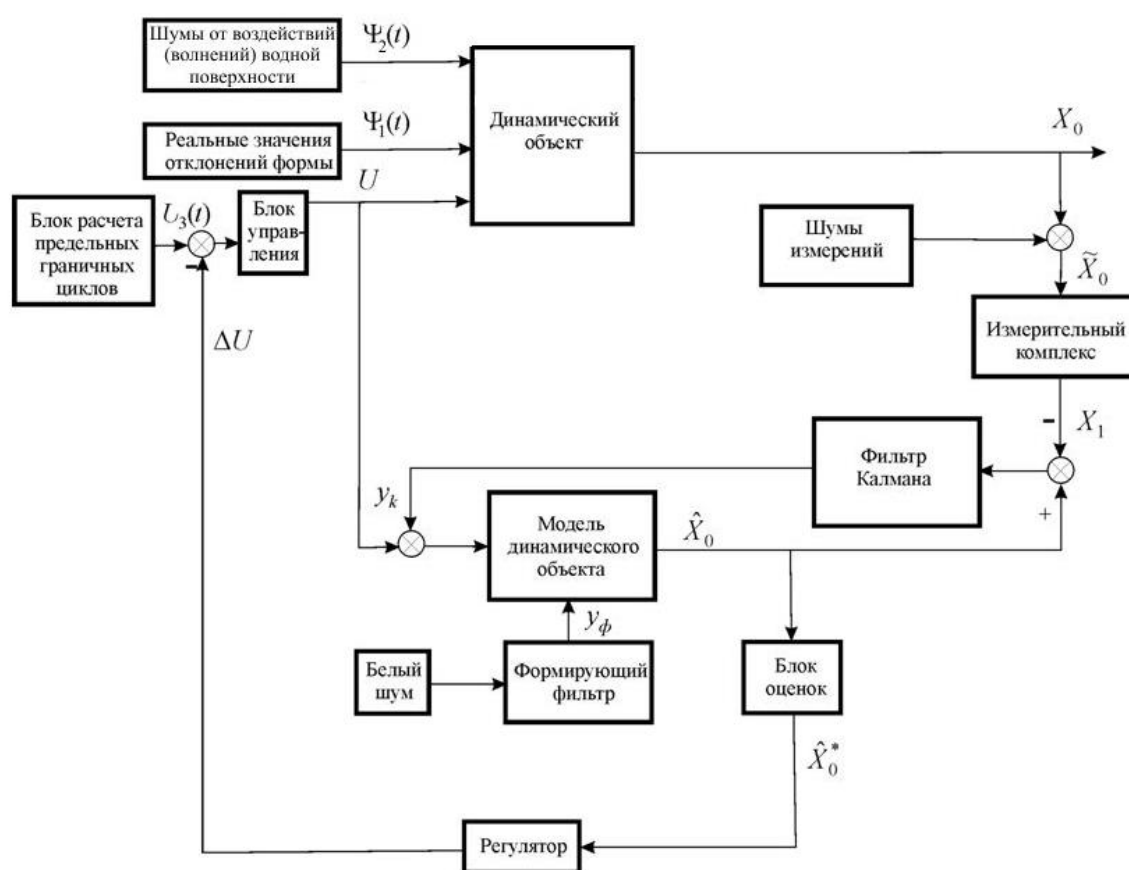


Рисунок 4 – Система управления, обеспечивающая реализацию циклов шлифования

Однако с течением времени значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений радиус-векторов и их моделей. Целесообразно использование блока подстройки состояний наблюдателя в форме фильтра Калмана-Бюсси, который осуществляет необходимую коррекцию входных сигналов, обеспечивая минимально возможное значение среднеквадратического отклонения.

Полученные оценки имеют наименьшую из возможных дисперсию (при условии гауссовских шумов измерений) и пригодны для использования в системах управления по отклонению. Такая система (рис. 4) должна стабилизировать режимы относительно режимов, задаваемых

условиями граничного технологического цикла с минимально допустимыми запасами и учитывать шумы от таких воздействий внешней среды, как волнение водной поверхности, передаваемое через палубу плавучей мастерской технологическому оборудованию.

Таким образом, для решения проблемы обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при чистовом шлифовании на оборудовании, работающем в условиях плавучей мастерской, необходимо на основе полученных динамических моделей и оценок разработать автоматическую систему для стабилизации параметров технологической системы с учетом воздействий внешней среды, в частности волнений водной поверхности.

Для разработки модели поведения шлифовального круга и заготовки в процессе обработки дадим математическое описание процесса, характеризующего взаимодействие шлифовального круга и заготовки.

Взаимодействие шлифовального круга и заготовки в первую очередь характеризуются параметрами формы шлифовального круга и заготовки, их взаимоположением, упругими, демпфирующими и другими свойствами технологической системы [3]. В качестве математической модели шлифовального круга может рассматриваться вращающийся диск, а при ее одномерном представлении – вращающаяся окружность. Центр вращения неизбежно не совпадает с центром формы, что и определяет дисбаланс круга, которым обычно и объясняют появление периодически изменяющихся сил, возникающих при шлифовании. Кроме того, поверхность круга не имеет идеальной геометрии. Обнаруживаются закономерные и случайные отклонения формы и волнистость, амплитуда, частота и фаза которых изменяются за период стойкости инструмента.

Для процесса круглого наружного шлифования схема взаимодействия имеет вид, представленный на рис. 5.

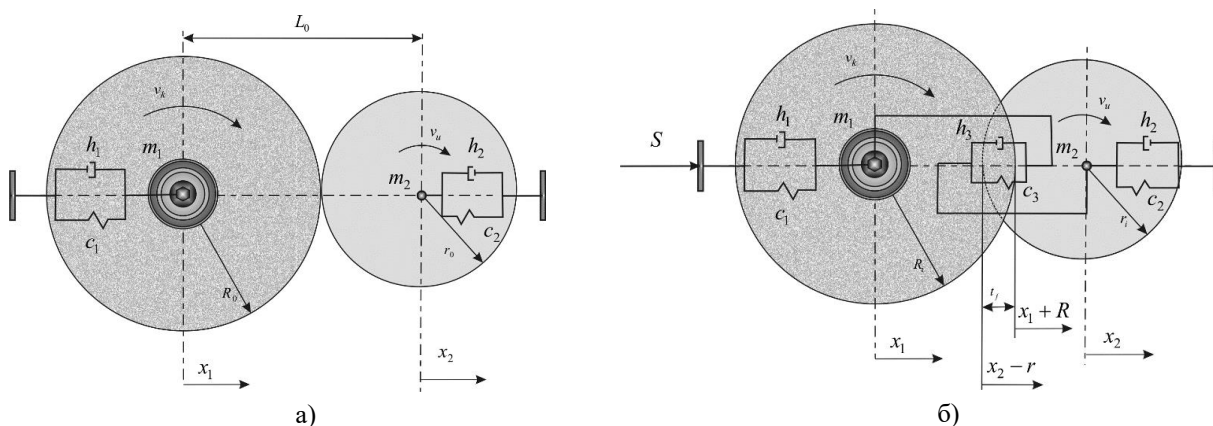


Рисунок 5 – Эквивалентная схема динамической системы круглошлифовального станка

На основе принципа возможных перемещений для системы (рис. 5) построена ее модель в виде совокупности дифференциальных уравнений, характеризующих динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания в процессе круглого наружного шлифования:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3 \dot{t}_f + c_3 t_f - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3 \dot{t}_f - c_3 t_f = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где m_1, m_2 – приведенные массы соответственно заготовки с центрами и круга со шпинделем; h_i – коэффициент сопротивления i -го звена; c_i – коэффициент жесткости i -го звена; x_1 и x_2 – координаты центров вращения круга и заготовки соответственно; S – путь, пройденный механизмом подачи за время t ; t_f – фактическая глубина резания.

Фактическая глубина резания (размер зоны контакта заготовки с инструментом по линии центров, рис. 5, б) определяется:

$$t_f = R + r - L,$$

где $R = R_0 + \Delta R$ – текущий радиус-вектор поверхности круга с учетом его износа и отклонений формы ΔR ; $r = r_0 + \Delta r$ – текущий радиус-вектор заготовки с учетом съема материала и отклонений формы Δr ; $L = L_0 + \Delta L = L_0 + x_2 - x_1$ – текущее расстояние между центрами вращения круга и детали.

С учетом полученного определения t_f и ее составляющих элементов система (4) запишется

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1(\dot{x}_1 - \dot{S}) + h_3(\dot{R} + \dot{r} - \dot{x}_2 + \dot{x}_1) + \\ + c_1(x_1 - S) + c_3(R_0 + \Delta R + r_0 + \Delta r - \\ - L_0 - x_2 + x_1) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3(\dot{R} + \dot{r} - \dot{x}_2 + \dot{x}_1) - \\ - c_3(R_0 + \Delta R + r_0 + \Delta r - L_0 - x_2 + x_1) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Для исходного положения заготовки (рис. 5, а) в момент начала ее контакта с инструментом ($L_0 = R_0 + r_0$; $S_0 = 0$; $x_{10} = 0$; $x_{20} = 0$; $t_f = 0$) система уравнений (5) в отклонениях запишется:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3(\dot{x}_1 + \dot{R}) + c_3(x_1 + \Delta R) - \\ - h_3(\dot{x}_2 - \dot{r}) - c_3(x_2 - \Delta r) - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3(\dot{x}_2 - \dot{r}) + c_3(x_2 - \Delta r) - \\ - h_3(\dot{x}_1 + \dot{R}) - c_3(x_1 + \Delta R) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Вследствие вращения круга и заготовки вариации геометрических размеров имеют периодический или почти периодический характер, что и объясняет появление внутренних возбуждающих сил, в существенной степени определяющих динамику процесса шлифования. Для дальнейшего анализа динамическую систему (6) целесообразно привести к форме:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [-(h_1 + h_3)\dot{x}_1 - (c_1 + c_3)x_1 + \\ + h_3\dot{x}_2 + c_3x_2] - \frac{1}{m_1} [h_3(\dot{R} + \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)] + \\ + \frac{1}{m_1} [h_1\dot{S} + c_1S] \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [-(h_2 + h_3)\dot{x}_2 - (c_2 + c_3)x_2 + \\ + h_3\dot{x}_1 + c_3x_1] - \frac{1}{m_2} [h_3(\dot{R} + \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)] \end{cases} \quad (7)$$

Первые слагаемые правых частей соотношений (7) представляют собой компоненты с производными отклонений положения центров круга и детали, зависящие непосредственно от внутренних обобщенных координат динамической системы (геометрических и кинематических). Вторые слагаемые – отражают влияние отклонений форм круга и детали. Третье слагаемое первого уравнения в системе (7) отражает воздействие пути врезания и подачи шлифовального круга на динамическую систему.

С обозначениями $y_1 = x_1$, $y_2 = \dot{y}_1 = \dot{x}_1$, $y_3 = x_2$, $y_4 = \dot{y}_3 = \dot{x}_2$ система (4) может быть приведена к нормальной форме Коши [4]:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = -\frac{1}{m_1} [(c_1 + c_3)y_1 + (h_1 + h_3)y_2 - c_3y_3 - h_3y_4] - \\ - \frac{1}{m_1} [c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\dot{R} + \dot{r})] + \frac{1}{m_1} [h_1\dot{S} + c_1S], \\ \dot{y}_3 = \dot{y}_4, \\ \dot{y}_4 = -\frac{1}{m_2} [(c_2 + c_3)y_3 + (h_2 + h_3)y_4 - c_3y_1 - h_3y_2] + \\ + \frac{1}{m_2} [c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\dot{R} + \Delta r)], \end{cases}$$

и записана в матричном виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U. \quad (8)$$

Для решения задач моделирования динамики процесса целесообразно записать соотношение (8) совместно с уравнением наблюдений.

В матричной форме пространства состояний система приобретает вид:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_0 &= A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Y_0 + F_0 \cdot V_0; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{Y}_0 &= \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}, Y_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1+c_3}{m_1} & -\frac{h_1+h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} & \frac{h_3}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_3}{m_2} & \frac{h_3}{m_2} & -\frac{c_2+c_3}{m_2} & -\frac{h_2+h_3}{m_2} \end{bmatrix}, \\ U &= \begin{bmatrix} S \\ \dot{S} \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix}, \Psi_1 = [\Delta R + \Delta r], \Psi_2 = [\dot{R} + \dot{r}], \\ B_{01} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{c_3}{m_1} \\ 0 \\ \frac{c_3}{m_2} \end{bmatrix}, B_{02} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_3}{m_1} \\ 0 \\ \frac{h_3}{m_2} \end{bmatrix}, C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_1}{m_1} & \frac{h_1}{m_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_0 = [B_{01} \quad B_{02}], \end{aligned}$$

где Y_0 – вектор (матрица-столбец), представляющая вектор состояния системы;

$\dot{Y}_0$ – вектор производных состояний системы; A_0 – матрица, характеризующая динамические свойства системы; B_0 – матрица параметров влияния отклонений формы детали и круга; Ψ – вектор состояний отклонений формы детали и круга от номинальных параметров; C_0 – матрица управления процессом; U – вектор управляющих воздействий, связанный с поперечной подачей.

$$E_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, F_0 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}, V_0 = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, T_0 = [t_f], Q_0 = [-1 \quad 1],$$

где E_0, F_0, V_0, T_0, Q_0 – соответственно матрицы состояния измерений; интенсивностей шумов измерителей; независимых гауссовых белых шумов измерителей единичной интенсивности; глубины резания; преобразования совокупных измерений.

Оцененная таким образом глубина резания t_f несвободна как от погрешностей, определяемых качеством процесса измерений шумами измерителей, так и от влияния случайных составляющих отклонений форм детали и круга от номинальных. Непосредственное получение скорости изменения глубины резания $\frac{dt_f}{dt}$ дифференцированием определенной в соответствии с соотношениями глубины резания t_f нецелесообразно вследствие присутствия аддитивных шумов в совокупных измерениях.

Для решения задачи определения скорости процесса резания может быть построена система наблюдений в форме фильтра Калмана [4].

Однако непосредственное применение модели (9) при построении наблюдателя нецелесообразно вследствие необходимости дифференцирования сигнала управления и отклонений форм, что при наличии шумов в канале управления и вычислительных погрешностях при реализации дифференцирования может привести к существенным затруднениям в применении этого подхода. Это не является ни особенностью матричного представления модели, ни описания динамической системы в отклонениях, а проявляется уже в исходном представлении (6) технологической системы.

Для устранения указанного недостатка необходимо построить «уравнение восстановления», которое в случае отклонений форм будет иметь выражение:

$$X_0 = D_0 \cdot Y_0, \quad (10)$$

где D_0 – матрица, характеризующая состав оценок параметров пространства состояний и структуру их линейных комбинаций.

Если необходимы оценки всего пространства состояний, то D_0 представляет собой единичную матрицу. Введем модифицированный вектор состояния системы вида:

$$F = Y_0 - B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (11)$$

где Y_0, B_{02}, Ψ_1 – соответствуют выражениям, представленным в зависимости (9).

Из записи соотношения (9) непосредственно следует, что $\dot{\Psi}_1 = \Psi_2$.

Из уравнения (11) следует:

$$Y_0 = F + B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (12)$$

Известно, например [5], что для любых совместных по форме матриц $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ справедливо соотношение $\frac{d[\alpha(t) \cdot \beta(t)]}{dt} = \alpha(t) \frac{d\beta(t)}{dt} + \beta(t) \frac{d\alpha(t)}{dt}$.

Производная $\dot{Y}_0$ вектора состояния, полученная с учетом равенства (12) и приведенного выше матричного тождества, имеет вид:

$$\dot{Y}_0 = \dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \psi_1 + B_{02} \cdot \psi_2. \quad (13)$$

С раскрытием расщепленных форм матричное уравнение (9) можно переписать в виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (14)$$

Подстановка в правую часть уравнения (14) Y_0 из (8), приводит к результату:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (15)$$

Из сравнения левых частей (13) и (15) следует:

$$\dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \psi_1 + B_{02} \cdot \psi_2 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U$$

После соответствующих преобразований и группировки можно записать модифицированное уравнение состояния, не содержащее ψ_2 , и, следовательно, не требующее дифференцирования параметров форм ψ_1 :

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (16)$$

Сравнение уравнения (16) для модифицированного пространства состояний F и исходного соотношения (9) для пространства состояний Y_0 позволяет рассматривать коэффициент, стоящий перед матрицей Ψ_1 :

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \quad (17)$$

как модифицированную матрицу влияния отклонения формы детали и круга.

Если дополнительно параметры демпфирования зоны контакта, массы заготовки и шлифовального круга в процессе обработки принять не зависящими от времени, то элементы матрицы $\dot{B}_{02}$ равны нулю и выражение (17) приобретает форму:

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01}].$$

Модифицированное матричное дифференциальное уравнение пространства состояния имеет вид:

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (18)$$

Как системе дифференциальных уравнений (9), так и (18) соответствуют совпадающие с точностью до обозначений $Y_0, \dot{Y}_0$ и $F, \dot{F}$ системы однородных линейных дифференциальных уравнений $\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0$ и $\dot{F} = A_0 \cdot F$. Следовательно, первое уравнение системы (9) и соотношение (18) являются эквивалентными в смысле Ляпунова [5].

Оценка состояния X_0 на основе результатов моделирования модифицированной системы (18) может быть восстановлена в состояниях (10) применением к результатам (18) преобразования (14):

$$X_0 = D_0 \cdot F + D_0 \cdot B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (19)$$

где матрицы X_0, D_0, B_{02}, Ψ_1 соответствуют матрицам, использованным в (9), а модифицированный вектор состояния F определяется (19).

Используя рассмотренный подход, представим произведение матриц $C_0 \cdot U_0$ системы (9) в виде:

$$C_0 \cdot U_0 = C_{00} \cdot S + C_{01} \cdot \dot{S},$$

где

$$C_{00} = \begin{bmatrix} c_1 \\ m_1 \end{bmatrix}^T, \quad C_{01} = \begin{bmatrix} 0 & h_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

и перестроим модель системы (9) в форме, не требующей дифференцирования сигнала управления. При этом также необходимо преобразовать и уравнения наблюдения системы с целью восстановления состояний, подлежащих контролю, что позволяет получить:

$$\begin{aligned} \dot{F} &= A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_1 \cdot U; \\ Z_0 &= E_0 \cdot F + F_0 \cdot V_0 + D_M \cdot S; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0 \end{aligned} \quad (20)$$

где матрицы $A_0, E_0, Z_0, F_0, V_0, T_0, Q_0$ совпадают с такими же матрицами в соотношениях (6):

$$\begin{aligned} F &= [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_3]^T, \quad \dot{F} = [\dot{F}_1 \ \dot{F}_2 \ \dot{F}_3 \ \dot{F}_3]^T, \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{h_3 h_2}{m_1 m_2} & 0 & \frac{(h_3 + h_2) h_2}{m_2^2} - \frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix}^T, \quad D_M = \begin{bmatrix} 0 & \frac{h_2}{m_2} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

Каждое из отклонений формы от номинальной (ΔR_i , Δr_i) и их производные, имеющие случайный характер, могут быть охарактеризованы гауссово-марковскими случайными процессами второго порядка с корреляционными функциями вида [3], которые представлены в форме:

$$K_i(v_i, \tau) = K_{0i} \cdot \exp(-\alpha_i v_i |\tau_i|) \cdot \cos(\beta_i v_i \tau_i),$$

где v_i – окружная скорость круга или детали; соответственно K_{0i} , α_i , β_i – параметры корреляционной функции, которые могут быть определены экспериментально.

В практически важных случаях эффекты, обуславливаемые взаимно корреляционными функциями процессов и соответствующими энергетическими взаимными спектральными плотностями, малы относительно энергетических спектральных характеристик круга и детали.

Для таких случайных процессов тем же методом построен расширенный формирующий фильтр, позволяющий представить второе слагаемое первого уравнения системы (9) эквивалентными параметрами и переменными уравнений состояния формирующих фильтров:

$$\begin{aligned} \dot{G} &= A_f \cdot G + B_f \cdot W; \\ R &= C_f \cdot G; \\ H_f &= Q_f \cdot R, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \dot{G} &= \begin{bmatrix} \dot{G}_1 \\ \dot{G}_2 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}, \quad A_f = \begin{bmatrix} A_{f1} & A_k \\ A_k & A_{f2} \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} B_{f1} & 0 \\ 0 & B_{f1} \end{bmatrix} \\ \dot{G}_i &= \begin{bmatrix} \dot{g}_{1i} \\ \dot{g}_{2i} \end{bmatrix}, \quad G_i = \begin{bmatrix} g_{1i} \\ g_{2i} \end{bmatrix} \\ A_{fi} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{T_{1i}^2} & \frac{T_{2i}}{T_{1i}^2} \end{bmatrix}, \quad B_{fi} = \begin{bmatrix} k_{fi} \cdot T_{3i} \\ -1 - k_{fi} \cdot T_{3i} \cdot T_{2i} \end{bmatrix}, \quad i \in \{k, \partial\} \\ C_{fi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_f = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{r}_i + \Delta \tilde{r}_i \\ \tilde{r}_i + \tilde{r}_i \end{bmatrix}, \quad Q_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \Psi_w &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{1i} = \frac{1}{v_i^2 (\alpha_i^2 + \beta_i^2)}, \quad T_{2i} = \frac{2\alpha_i}{v_i (\alpha_i^2 + \beta_i^2)}, \\ k_{fi} &= \sqrt{\frac{2K_{0i}\alpha_i}{v_i (\alpha_i^2 + \beta_i^2)}}, \end{aligned}$$

где $g_{1i}, g_{2i}; \dot{g}_{1i} = \dot{g}_{2i}$ – вспомогательные состояния формирующего фильтра; w_1, w_2 – независимые между собой и шумами измерений V_0 гауссовы белые шумы единичной интенсивности.

С учетом (21) расширенная модель системы (9) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{F} \\ \dot{G}_f \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_0 & B_1 \cdot Q_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ G_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix} \cdot W; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Q_0 \begin{bmatrix} F \\ G_f \end{bmatrix} + F_0 \cdot V_0 + D_M \cdot U; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (22)$$

где дополнительно:

$$Q_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Первое и второе уравнения системы (22) целесообразно представить в форме:

$$\begin{aligned} X &= A \cdot X + B \cdot U + E \cdot W \\ Z &= C \cdot X + R \cdot V \end{aligned} \quad (23)$$

Вид и структура матриц в соотношениях (23) однозначно определяются системой (19).

Для системы (23) можно построить оптимальные в среднеквадратическом смысле оценки состояния системы в форме фильтра Калмана.

Минимально достижимая дисперсия оценок состояния системы (23) может быть оценена матричным уравнением Риккати вида [3]:

$$\begin{aligned} \tilde{V} &= A \cdot \tilde{V} + \tilde{V} \cdot A^T + E \cdot \Psi_w \cdot E^T - \\ &- \tilde{V} \cdot C^T \cdot \Psi_v^{-1} \cdot C \cdot \tilde{V}, \end{aligned} \quad (24)$$

которое решается до начала процесса обработки конкретной детали вследствие того, что в нем отсутствуют результаты наблюдений за динамической системой.

Матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана определяется следующей зависимостью [6]:

$$K = \tilde{V} \cdot C \cdot \Psi_v^{-1}. \quad (25)$$

С учетом (24), (25) алгоритм фильтрации наблюдений определяется матричными уравнениями:

$$\hat{\dot{Y}} = A \cdot \hat{Y} + B \cdot U + K \cdot [Z - B \cdot U - C \cdot \hat{X}]; \quad \begin{bmatrix} \hat{t}_f \\ \hat{\dot{t}}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{Y}. \quad (26)$$

Соотношения (25), (26) позволяют использовать результаты измерений координат в процессе обработки детали с целью построения оценок параметров процесса обработки. Эти оценки являются оптимальными при условии гауссовости шумов измерений и возбуждений.

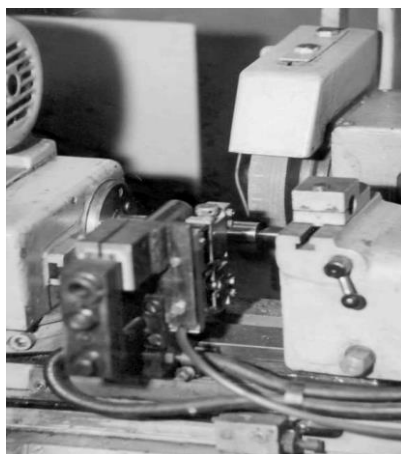
Применение предложенного подхода целесообразно при оценках непосредственно неизмеряемых параметров. Подход позволяет снизить влияние как шумов измерения, так и шумов, связанных с вычислительными процедурами соответствующих оценок. Его необходимо непосредственно использовать при реализациях процедур стохастического наблюдения и фильтрации.

В проведенных исследованиях состояния технологической системы использована экспериментальная установка на базе круглошлифовального станка модели 3Е153, оборудованного необходимыми тензометрическими устройствами; общий вид и отдельные элементы изображены на рис. 6.

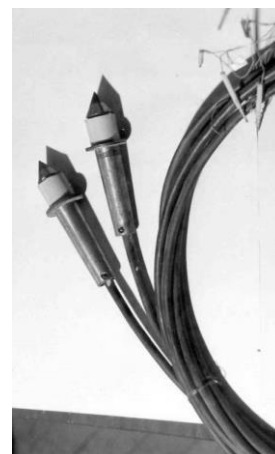
Проведенный анализ и декомпозиция системы станка позволили выявить подсистемы и связи между ними, вызывающие колебания объекта под действием сил динамических воздействий [2].

Для определения динамических характеристик несущей системы станка, а именно, амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик, необходимо дополнительно исследовать влияние на динамику станка морского волнения, в качестве внешних сил действующего на плавучее основание ПРМ.

В процессе функционирования ПРМ на плавучее основание воздействуют возмущающие силы ветра, течения и морского волнения.



а)



б)

Рисунок 6 – Общий вид экспериментальной установки (а) на базе круглошлифовального станка и устройство для измерения сил резания и вибраций (б)

Воздействие ветра может быть оценено путем измерения скорости и направления ветра румбоанемометрами, установленными на плавучем основании, и расчета аэродинамических сил по известным соотношениям [7, 8]:

$$F_{XB} = C_{XB}(\beta)\rho_B S_{XB} v_B^2 / 2; F_{YB} = C_{YB}(\beta)\rho_B S_{YB} v_B^2 / 2; \quad (27)$$

$$M_{ZB} = C_{MB}(\beta)\rho_B S_{YB} L_B v_B^2 / 2,$$

где C_{XB} , C_{YB} , C_{MB} – аэродинамические коэффициенты плавучего основания – функции от угла ветра β ; ρ_B – удельная плотность воздуха; v_B – скорость ветра относительно плавучего основания; S_{XB} , S_{YB} , L_B – эффективные площади сопротивления и характерная длина судна.

Параметры S_{XB} , S_{YB} , L_B , $C_{XB}(\beta)$, $C_{YB}(\beta)$, $C_{MB}(\beta)$ могут быть с достаточной точностью определены при испытаниях масштабных моделей и уточнены при экспериментах.

Скорость ветра определяется суммой следующих составляющих

$$v_B = v_{BO} + v_{TO} + v_{TB}, \quad (28)$$

где v_{BO} – средняя скорость ветра; v_{TO} – турбулентная составляющая; v_{TB} – волновая составляющая.

Как турбулентная, так и волновая составляющие являются стационарными центрированными функциями времени [8]. Волновая составляющая скорости ветра определяется морским волнением [9]. Ее корреляционная функция практически совпадает с соответствующей характеристикой волновых ординат, отличаясь дисперсией.

Воздействие морского волнения на плавучее основание сказывается в форме горизонтально-продольных колебаний, горизонтально-поперечных колебаний, вертикальных перемещений, бортовой и килевой качки, а также рыскания. Соотношения между видами качки зависят как от параметров плавучего основания, так и от его расположения относительно генерального направления бега волн. Соотношения между различными видами качки и их амплитуды для плавучего основания, удерживающегося в заданной точке или перемещающегося предельно малыми ходами, зависят от курсового угла и эффективного угла волнового склона

$$\varepsilon_X = \varepsilon_0 \sin x, \quad (29)$$

где x – курсовой угол волны относительно направления распространения волны; ε_0 – угол волнового склона в заданной точке.

Согласно существующим представлениям [9, 10, 11] морское волнение являет собой суперпозицию большого числа плоских (двумерных) волновых систем, распространяющихся под различными углами к генеральному направлению бега волн. Последнее, в случае ветров постоянного направления, через 4...6 часов совпадает с направлением ветра. В достаточно

удаленных от берегов районах, в условиях действия ветра постоянной интенсивности наблюдается развитое морское волнение. Поведение ординаты волнового профиля в любой заданной точке развитого морского волнения характеризуется случайной стационарной центрированной функцией $r_B(t)$ с нормальным законом распределения.

Математическое описание ветрового волнения производится на основе обработки и аппроксимации экспериментальных данных. К настоящему времени известно более десяти форм представления спектра волнения, например, спектр, предложенный Международной конфедерацией опытовых бассейнов (МКОБ)

$$S(w) = Aw^{-5} \exp(-Bw^4), \quad (30)$$

где $A = 8,1 \cdot 10^{-3} g^2$, $B = 3,11 \cdot h_{1/3}^2$, g – ускорение силы тяжести в заданной точке; $h_{1/3}^2$ – высота волны обеспеченности; w – угловая частота волнения.

Для задач синтеза системы автоматического управления и входящих в их состав измерительных подсистем необходимо построение формирующих фильтров, позволяющих получать на выходе процессы с заданными характеристиками, что является целью настоящей работы. Такие фильтры известными методами могут быть достаточно просто построены для процессов, характеризующихся спектральными плотностями с дробно-рациональным описанием [12,13]. Аппроксимация спектров двухмерного морского волнения, удовлетворяющего указанным требованиям, имеет вид [11]:

$$S_r = \frac{2D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)} \quad (31)$$

где D_r – дисперсия волновой ординаты, m^2 ; $D_r = 0,143(0,5 \cdot h_{3\%})^2$; $\alpha = 0,21\beta$; $h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности, м.

Высота волны 3 % обеспеченности определяется степенью морского волнения в соответствии со шкалой ГУ ГМС (Регистра) [14], часть которой для наиболее важного диапазона условий, которые могут встретиться при производстве работ ПРМ, приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Шкала степени морского волнения

Степень волнения	Высота волны, $h_{3\%}$, м	Характеристика волнения
1	0...0,25	Слабое
2	0,25...0,75	Слабое
3	0,75...1,25	Значительное
4	1,25...2,0	Значительное
5	2,0...3,5	Сильное
6	3,5...6,0	Сильное

Параметр β связан с частотой максимума спектра развитого волнения зависимостью

$$\beta = 0,82 \overline{w_m}, \quad (32)$$

где частота максимума спектра $\overline{w_m}$ определяется соотношением

$$\overline{w_m} = 1,74 h_{3\%}^{-0,4}, \quad (33)$$

что совместно с (31) и (32) позволяет полностью определить спектральную плотность волновой заданной интенсивности для двухмерного волнения.

Наиболее точным по существующим представлениям является описание морского волнения суперпозицией волновых систем [9, 11]. Энергетические спектры двухмерного и трехмерного волнений связаны соотношением:

$$\int_0^\infty S_r(w) dw = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S_r(w, \alpha) d\alpha dw, \quad (34)$$

где α – угол распространения плоской системы волн относительно генерального направления.

Для описания энергетического спектра трехмерного волнения обычно используется формула Артура [11]:

$$S_r(w, \alpha) = \frac{2}{\pi} S_r(w) \cos^2(\alpha), \quad (35)$$

где $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$; $S_r(w)$ – спектр двумерного волнения типа (32) или (33).

Подстановка (34) в (33) с учетом (31) позволяет записать выражение спектральной плотности трехмерного морского волнения, действующего на плавучее основание, расположенное под углом χ к генеральному направлению бега волн в форме:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_r(w) \cos^2(\alpha) \sin^2(\chi - \alpha) d\alpha, \quad (36)$$

где $(\chi - \alpha)$ – угол между осью плавучего основания и направлением распространения соответствующей плоской системы волн.

Интегрирование в правой части (36) приводит к результату:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \left(\frac{3}{4} \sin^2 \chi + \frac{1}{4} \cos^2 \chi \right) S_r(w), \quad (37)$$

где, как и ранее $S_r(w)$ – спектральная плотность двухмерного морского волнения с описанием вида (31) или (32).

С учетом (37) спектральная плотность трехмерного морского волнения приобретает форму:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{1 + 2 \sin^2 \chi}{4} \cdot \frac{D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)}. \quad (38)$$

Спектральной плотности типа (33) соответствует формирующий фильтр, изображение по Лапласу которого записывается как

$$\Phi_{\varepsilon\chi}(S) = \frac{\sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2}, \quad (39)$$

возбуждаемый сигналом типа белого шума.

Углы волнового склона для волн относительно малой амплитуды, к которым относится развитое морское волнение, могут быть определены выражением

$$\varepsilon = \frac{w^2}{g} r, \quad (40)$$

где r – радиус волны, $r = h/2$.

С учетом (40) формирующий фильтр угла волнового склона приобретает форму:

$$\Phi_{\varepsilon\chi}(S) = \frac{-S^2 \sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g(S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2)}. \quad (41)$$

При построении формирующих фильтров (37) и (41) для трехмерного морского волнения использован подход, предложенный А.В. Герасимовым [9] для определения дисперсии бортовой качки плавучего основания, расположенного лагом к волне, при воздействии двухмерного и трехмерного волнения.

В терминах пространства состояния [15, 16] формирующий фильтр угла волнового склона трехмерного морского волнения, действующего на плавучее основание, может быть получен на основании (41):

$$\dot{X}_\phi = A_\phi X_\phi + B_\phi V; \quad (42)$$

$$\varepsilon_x = C_\phi X_\phi + D_\phi V, \quad (43)$$

$$\text{где } A_\phi = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(\alpha^2 + \beta^2) & -2\alpha \end{pmatrix}, \quad X_\phi = \begin{pmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{pmatrix}; B_\phi = \begin{pmatrix} 2\alpha \\ \beta^2 - 3\alpha^2 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{(1 + 2\sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}};$$

$$C_\phi = (1 \ 0); D_\phi = \frac{-\sqrt{(1 + 2\sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}},$$

где V – белый шум; ε_χ – эквивалентный угол волнового склона для трехмерного морского волнения; $\alpha = 0,21\beta$, $\beta = 1,427h_{3\%}$, χ – угол между диаметральной плоскостью плавучего основания и генеральным направлением распространения бега волн; g – ускорение силы тяжести; D_r – дисперсия волновой ординаты; $h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности.

В соответствии с [15] соотношение (42) представляет “сообщение”, а выражение (43) – “наблюдение” над динамическим объектом – взволнованной жидкостью.

Согласно гидродинамической теории качки судна на волнении, силы, воздействующие на плавучее основание, определяются зависимостями [10, 11]:

$$F_{\tilde{x}} = -\alpha_\xi V \rho g k r(t); F_{\tilde{y}} = -\alpha_\zeta V \rho g k r(t); F_{\tilde{z}} = -\alpha_\varsigma S g r(t); M_{\tilde{x}} = \alpha_\theta V h \rho g k r(t);$$

$$M_{\tilde{y}} = \alpha_\psi V H \rho g k r(t); M_{\tilde{z}} = \alpha_\phi V L \rho g k r(t), \quad (44)$$

где α_ξ , α_ζ , α_ς , α_θ , α_ψ , α_ϕ – редуцированные коэффициенты поперечно-горизонтальной, продольно-горизонтальной, вертикальной, бортовой, килевой качки и рыскания соответственно; V – водоизмещение судна; ρ, g – удельная плотность воды и ускорение силы тяжести; k – волновое число, $k \cong w^2/g$; S – площадь ватерлинии; h, H – малый и большой метacentрический радиусы судна; w – круговая частота волнения; $r(t)$ – ордината волнового профиля; t – время.

Согласно тем же источникам продольно-горизонтальные силы $F_{\tilde{x}}$ и соответствующие им смещения, вызываемые морским волнением, для достаточно удлиненных судов малы и обычно не учитываются. При определении главной части возмущающих сил корпуса таких судов могут быть представлены профилем крыла малого удлинения. Численный анализ показывает, что даже при волнении высотой 6 м (6 баллов), продольные смещения судов не превышают единиц сантиметров. Достаточно удлиненными считаются суда с отношением длины к ширине корпуса больше четырех. Плавучие мастерские относятся именно к таким типам вследствие большой длины плавучего основания.

Редуцированные коэффициенты могут быть определены либо путем испытания масштабных моделей в опытовых бассейнах, либо путем интегрирования расчетных полей давления во взволнованной жидкости.



Рисунок 7 – Виброизолирующие опоры новой конструкции

Проведенные мероприятия и дополнительные теоретические и практические исследования процесса шлифования с учетом воздействия на оборудование внешней среды (в виде морского волнения) через корпус плавучего основания ремонтной мастерской, выполненные в Севастопольском государственном университете, позволили создать новые конструкции виброизолирующей опоры (рис. 7) [17] и виброизолирующего устройства металлорежущего станка (рис. 8) [18].

Виброизолирующие опоры (рис. 8), установленные регулировочными винтами в отверстиях станины станка, работают следующим образом. Внешние источники колебаний в процессе работы через поверхность пола передают колебательные

воздействия основанию с резиновым элементом и цилиндру. Цилиндр, перемещаясь относительно поршня со штоком и перемещая жидкость под высоким давлением через клапаны, обеспечивает гашение колебаний, то есть гидравлическое демпфирование. При этом резиновый элемент, сжимаясь и выпучиваясь по свободным поверхностям, взаимодействует с вкладышем верхней крышки опоры, а также с полостями в пазах. В связи с тем, что при работе станка частота его собственных колебаний достаточно велика, в гашении как внешних, так и собственных колебаний принимают участие гидравлический демпфер (цилиндр, рабочая жидкость, поршень со штоком) и резиновый элемент с ребрами жесткости, которые обеспечивают также гашение колебаний в горизонтальной плоскости.

Виброизолирующее устройство (рис. 8) повышает надежность виброзащиты металлорежущих станков, установленных и работающих в условиях ПРМ, от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности; упрощает возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования; повышает качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних и внутренних колебаний.

Улучшается динамическая стабилизация шлифовальной обработки за счет уменьшения внешних и внутренних колебаний, гашению которых способствуют виброизолирующие опоры и пружинные аккумуляторы в гидроцилиндрах.

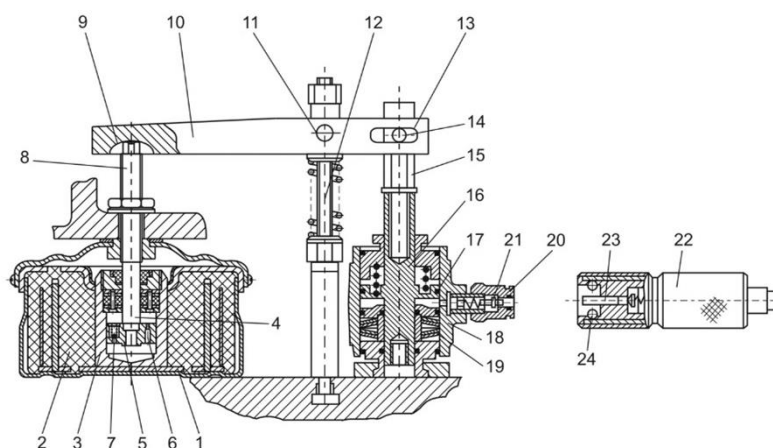


Рисунок 8 – Общий вид виброизолирующего устройства: 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики

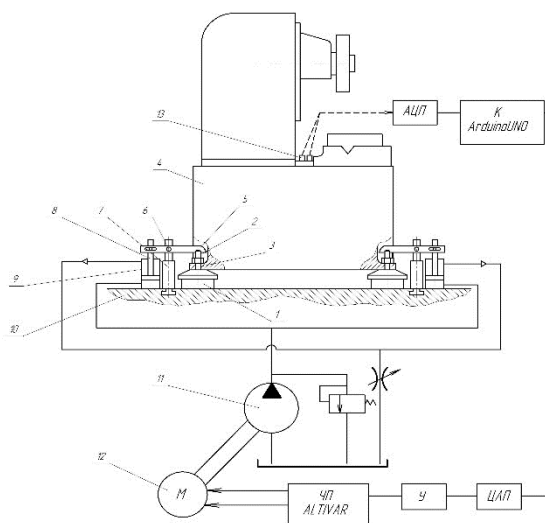


Рисунок 9 – Схема устройства автоматической виброзащиты станка, работающего в условиях плавучей мастерской

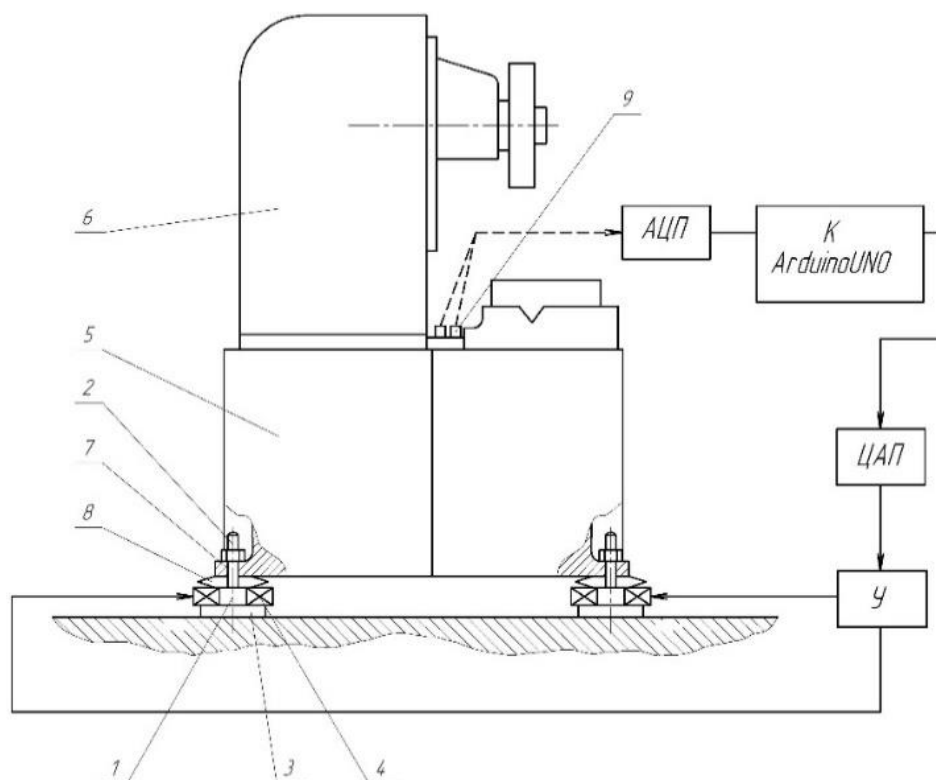


Рис. 10. Схема опоры металлорежущего станка с активной виброизоляцией

Разработано также устройство (рис. 9) автоматической виброзащиты шлифовального станка, работающего в условиях плавучей мастерской [19]. Металлорежущий станок устанавливают на общей поверхности палубы механообрабатывающего участка плавучей ремонтной мастерской на четырех виброизолирующих опорах 1 [17], выполненных в виде основания с резиновым элементом и установленным в осевом отверстии цилиндром с рабочей жидкостью, поршнем со штоком, размещенным и зафиксированным в отверстиях станины станка.

На рис. 10 показан общий вид нового устройства опоры металлорежущего станка с активной виброизоляцией [20]. Устройство содержит цилиндрический корпус с гидравлической полостью, заполненной магнитореологической жидкостью (условно не показаны), шток с поршнем, клапанами, уплотнительным и направляющим узлами (условно не показаны).

Устройства позволяют обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, в том числе и от колебаний водной поверхности; повысить динамические качества станка и надежность его виброзащиты при работе в условиях плавучих мастерских; обеспечить возможность регулировки управляющих воздействий на жесткость виброизолирующих опор в широком диапазоне путем использования современной платформы ArduinoUNO, имеющей 14 цифровых входов и 6 выходов, кварцевый генератор, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и устройство перезагрузки; повысить качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует виброизолирующая механо-гидравлическая опора с автоматическим регулированием жесткости в зависимости от сигналов с вибродатчиков, размещенных на незначительном удалении от рабочей зоны станка. Второе устройство [20] обеспечивает также высокое быстродействие системы управления за счет уникальных свойств магнитореологической жидкости (реакция системы – 1 миллисекунда). При этом повышается качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует опора с активной виброизоляцией за счет изменения вязкости магнитореологической жидкости в зависимости от сигналов вибродатчиков.

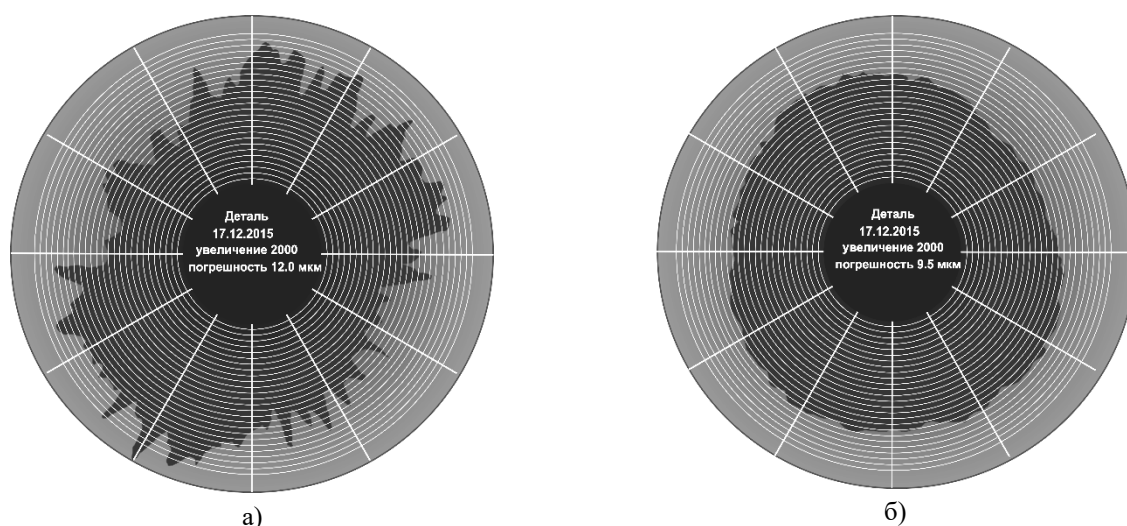


Рисунок 11 – Примеры профилограмм обработанных поверхностей шеек валов на круглошлифовальном станке по базовому варианту (а) и с использованием новых виброизолирующих устройств (б)

В процессе испытаний все детали, прошлифованные с использованием виброизолирующих опор новой конструкции, по шероховатости поверхности, допуску на изготовление, биению относительно оси соответствовали требованиям технологической документации. Отмечено повышение стабильности показателей качества (табл. 2, рис. 11) операции шлифования.

Таким образом, выполненные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность динамической стабилизации шлифовальной обработки посредством применения новых виброизолирующих устройств и возможность их широкого применения в производственных условиях, в частности на плавучих мастерских.

Таблица 2 – Сравнительные результаты качества поверхностей шеек валов, обработанных с применением виброизолирующих устройств

№ пар- тии	Биение опорных шеек– Δ ,мкм			Шероховатость поверхности – R_a , мкм		
Базовый вариант						
	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²
1	0,025	0,01	6,4	0,63	0,41	$1,3 \times 10^{-3}$
2	0,023	0,009	5,5	0,62	0,51	$0,4 \times 10^{-3}$
3	0,024	0,012	4,0	0,63	0,46	$0,7 \times 10^{-3}$
Σ_i	0,023	0,0103	5.3	0,62	0,46	$0,8 \times 10^{-3}$
Предлагаемый вариант						
	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²
1	0,020	0,009	3,36	0,41	0,30	$0,34 \times 10^{-3}$
2	0,014	0,005	2,3	0,32	0,22	$0,28 \times 10^{-3}$
3	0,019	0,008	2,8	0,40	0,29	$0,35 \times 10^{-3}$
Σ_j	0,017	0,0073	2,82	0,376	0,27	$0,32 \times 10^{-3}$
$\frac{\Sigma_i}{\Sigma_j}$	1,35	1,41	1,85	1,64	1,703	2,5

Выводы.

Такой подход позволил на основе системного анализа процесса, моделирования и оценок, исследования влияния на динамику станка морского волнения, в качестве внешних сил дей-

ствующего на плавучее основание плавучей мастерской, оптимизации структуры виброзащитной системы станка [21], решить задачу обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования и создать реальные конструкции эффективных вариантов виброизолирующих опор и устройств. Предложены конструктивные решения по обеспечению эффективного управления демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, а также опора с активной виброизоляцией. Полученные результаты являются основой для дальнейших экспериментальных исследований параметров и характеристик технологической системы круглошлифовального станка в условиях плавучей мастерской, а также надежности виброизолирующих устройств с целью повышения качества шлифовальной обработки и точности детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

16. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая. // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. — № 35 — С. 13-22.
17. Владецкая Е.А. Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. — Харків: НТУ «ХПІ», 2012. — Вип.7 — С. 103-111.
18. Братан С.М. Экспериментальные исследования случайных размерных параметров шлифовального круга и построение аналитических зависимостей для оценки влияния его рельефа на входные шумы операции шлифования / С.М. Братан // Нові матеріали і технології в металургії: Научний журнал ЗДТУ. — Запоріжжя: ЗДТУ, 2000. — Вип.1— С.83-86.
19. Братан С.М. Синтез подсистемы наблюдений для операции плоского шлифования/С.М. Братан // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць ХДПУ.—Харків: ХДПУ «ХПІ»,2000. — Вип.1(3) — С.22-31.
20. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц/ Ф.Р.Гантмахер. — М.: Наука, 1988.— 552 с.
21. Братан С.М. Управление операцией плоского шлифования с динамической стабилизацией параметров технологического цикла / С.М.Братан.//Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. — Харьков: ХГПУ, 2000. — Вип. 57. — С.17-23.
22. Волосенко Е.Б. К вопросу воздействия ветровой нагрузки на судно/ Е.Б. Волосенко// Мореходность и управляемость судов. — Л.: Судостроение, 1988. — Вип.105. — с. 53-60.
23. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания/ А.Д. Гофман. — Л.: Судостроение, 1991. — 236 с.
24. Луговский В.В. Динамика моря/ В.В. Луговский. — Л.: Судостроение, 1996. — 200 с.
25. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Динамика (качка) корабля/ С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин — Л.: Судостроение, 1995. — 176 с.
26. Бородай И.К. Качка судов на морском волнении/ И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. — Л.: Судостроение, 1989. — 432 с.
27. Расцепляев Ю.С. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления/ Ю.С. Расцепляев, В.Н. Фандиенко. — М.: Энергия, 1991. — 145 с.
28. Стир Е.Б. Формирующие фильтры для случайных процессов. В кн. Современная теория автоматического управления / Под ред. К.Т. Леондеса. — М.: Мир, 1970. — С.159-194.
29. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные (Регистр СССР). — Л.: Транспорт, 1984. — 264 с.
30. Брамлер К. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация / К. Брамлер, Г. Зифлинг. — М.: Наука, 1982. — 200 с.
31. Сейдж Э.П. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении/ Э.П. Сейдж. — М.: Связь, 1996. — 196 с.
32. Харченко О.О., Владецька К.О., Братан С.М. Віброізолююча опора металорізального верстата // Патент України 36389, 2008, Бюл.№20.
33. Харченко О.О., Владецька К.О., Братан С.М., Владецький Д.О. Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні// Патент України 51621, 2010, Бюл.№14.
34. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М. и др. Устройство автоматической виброзащиты металлорежущего станка // Патент России RU 158629 U1, 2016, Бюл.№2.
35. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М. и др. Опора металлорежущего станка с активной виброизоляцией// Патент России RU 159415 U1, 2016, Бюл.№4.
36. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.— Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). — С.88-103.

REFERENCES

1. Bratan S.M. Analiz vliianiia kolebanii, peredavaemykh cherez fundament stanka, na kachestvo protsessa shlifovaniia / S.M. Bratan, E.A. Vladetskaia. // Vestnik NTU «KhPI»: Sb. nauchn. trudov. — Khar'kov: NTU «KhPI», 2008. — № 35 — S. 13-22.
2. Vladetskaia E.A. Povyshenie vibroustoi-chivosti shlifoval'nykh stankov plavuchikh remontnykh masterskikh / E.A. Vla-detskaia, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko // Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prats'. — Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. — Vip.7 — S. 103-111.
3. Bratan S.M. Eksperimental'nye issle-dovaniia sluchainykh razmernykh parametrov shlifoval'nogo kruga i postroenie analiticheskikh zavisimostei dlia otsenki vliianiia ego rel'efa na vkhodnye shumy operatsii shlifovaniia / S.M. Bratan // Novi materiali i tekhnologii v metalurgii: Nauchnyi zhurnal ZDTU. — Zaporizhzhia: ZDTU, 2000. — Vip.1— S.83-86.
4. Bratan S.M. Sintez podsistemy nabliu-denii dlia operatsii ploskogo shlifovaniia/S.M. Bratan //Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prats' KhDPU.—Kharkiv: KhDPU «KhPI»,2000. — Vip.1(3) — S.22-31.
5. Gantmakher F.R. Teoriia matrits/ F.R.Gantmakher. — M.: Nauka, 1988.— 552 s.
6. Bratan S.M. Upravlenie operatsiei ploskogo shlifovaniia s dinamicheskoi stabilizatsiei parametrov tekhnologicheskogo tsikla / S.M.Bratan./Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhd. nauchn.-tekhn. sb. — Khar'kov: KhGPU, 2000. — Vyp. 57. — S.17-23.
7. Volosenko E.B. K voprosu vozdviizhivai vetrovoi nagruzki na sudno/ E.B. Volosenko// Morekhodnost' i upravliae-most' sudov. — L.: Sudostroenie, 1988. — Vyp.105. — s. 53-60.
8. Gofman A.D. Teoriia i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniia/ A.D. Gofman. — L.: Sudostroenie, 1991. — 236 s.
9. Lugovskii V.V. Dinamika moria/ V.V. Lugovskii. — L.: Sudostroenie, 1996. — 200 s.
10. Blagoveshchenskii S.N. Spravochnik po statike i dinamike korablia. Dinamika (kachka) korablia/ S.N. Blago-veshchenskii, A.N. Kholodilin — L.: Sudostroenie, 1995. — 176 s.
11. Borodai I.K. Kachka sudov na morskome volnenii/ I.K. Borodai, Iu.A. Netsvetaev. — L.: Sudostroenie, 1989. — 432 s.
12. Rasshchepliaev Iu.S. Sintez modelei sluchainykh protsessov dlia issledovaniia av-tomaticeskikh sistem upravleniia/ Iu.S. Rasshchepliaev, V.N. Fandienko. — M.: Energiia, 1991. — 145 s.
13. Stir E.B. Formiruushchie fil'try dlia sluchainykh protsessov. V kn. Sovremennaia teoriia avtomaticheskogo upravleniia / Pod red. K.T. Leondeza. — M.: Mir, 1970. — S.159-194.
14. Veter i volny v okeanakh i moriakh. Spravochnye dannye (Registr SSSR). — L.: Transport, 1984. — 264 s.
15. Bramler K. Fil'tr Kalmana-B'iusi. De-terminirovannye nabliudeniia i stokhas-ticheskaia fil'tratsiia / K. Bramler, G. Zifling. — M.: Nauka, 1982. — 200 s.
16. Seidzh E.P. Teoriia otsenivaniia i ee primenenie v sviazi i upravlenii/ E.P. Seidzh. — M.: Sviaz', 1996. — 196 s.
17. Kharchenko O.O., Vladets'ka K.O., Bratan S.M. Vibrozoluiucha opora metalorizal'nogo verstata // Patent Ukrainy 36389, 2008, Biul.№20.
18. Kharchenko O.O., Vladets'ka K.O., Bratan S.M., Vladets'kii D.O. Vibrozoluiuchii pristrii metalorizal'nogo verstata plavuchoi remontnoi maisterni// Patent Ukrainy 51621, 2010, Biul.№14.
19. Vladetskaia E.A., Kharchenko A.O., Bratan S.M. i dr. Ustroistvo avtomaticheskoi vibrozashchity metallo-rezhushchego stanka // Patent Rossii RU 158629 U1, 2016, Biul.№2.
20. Vladetskaia E.A., Kharchenko A.O., Bratan S.M. i dr. Opora metallo-rezhushchego stanka s aktivnoi vibrozoliiatsiei// Patent Rossii RU 159415 U1, 2016, Biul.№4.
21. Vladetskaia E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noi obrabotki putem umen'-sheniia vneshnikh vozmushchenii v usloviakh plavuchei masterskoi/ E.A. Vladetskaia, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, D.O. Vladetskii // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii.— Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). — S.88-103.

Рецензент: д.т.н. профессор Покинтелица Н.И.

УДК [536.421.5+621.923.04]:537.52

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ СПАРК-ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ И АЛМАЗНО-ИСКРОВЫМ ШЛИФОВАНИЕМ

Ю.Г. Гуцаленко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» и Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, Украина

Получена 14.04.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

С позиций повышения износостойкости шлифованных поверхностей образованием высокоплотных тонкодисперсных структур с остаточными напряжениями сжатия рассматриваются и объясняются процессы последовательного формирования таких структур на вольфрамокарбидной основе электроразрядными технологиями спарк-плазменного спекания под давлением и алмазно-искрового шлифования. Показано, что величина давления в зоне рабочего контакта является определяющим фактором оптимизации рабочих процессов предварительного (спарк-плазменное спекание) и окончательного (алмазно-искровое шлифование) формообразования порошковой керамики повышенной функциональности. Электрофизическая активация твердотельной консолидации объекта формообразования определяется законом Пашена-Пеннинга для энергетической минимизации осуществимости электрического разряда по напряжению пробоя в приложении к максимальной текущей локальной пористости. Максимальной исходной порой допускается вакансия единичного зерна в его интерпретации сферической моделью.

Ключевые слова: карбид вольфрама, спарк-плазменное спекание, алмазно-искровое шлифование, электрический разряд, подавление пористости, тонкодисперсная структура, сжимающие напряжения.

ELECTROPHYSICAL ASPECT OF PRESSURE FORMING OF HIGHLY FUNCTIONAL NANOSTRUCTURED MATERIALS BY MEANS OF SPARK-PLASMA SINTERING AND DIAMOND-SPARK GRINDING

Yu.G. Gutsalenko

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute" & Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine

Received 14.04.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The sequence of processes of spark-plasma sintering under pressure and diamond-spark grinding to form high-density fine-dispersed structures on the basis of tungsten carbide is reviewed and explained from the standpoint of improving the wear resistance of ground surfaces by forming such structures with residual compressive stress. It is shown that the value of the working pressure in the contact zone is a determining factor in optimization of the preliminary (spark-plasma sintering) and final (diamond-spark grinding) working processes of a forming the functionally improved products on the base of ceramic powders of materials with high physical-mechanical characteristics. Electrophysical activation to solid consolidation of forming object is determined by the Paschen-Penning's law for energy minimization of feasibility of electric discharge under breakdown voltage as for the maximum current local porosity. Vacancy of a single grain in its volume interpretation of a spherical model is accepted as a maximal initial pore.

Keywords: tungsten carbide, spark-plasma sintering, diamond-spark grinding, electrical discharge, suppression of porosity, fine-dispersed structure, compressive stresses.

ВВЕДЕНИЕ

Высокофункциональные наноструктурные материалы являются одним из основных центров внимания современного, шестого технологического уклада в развитии мировой цивилизации [1]. Тенденция интенсификации возможностей техники и технологий требует совершен-

ствования теории и практики таких материалов повышенной износо- и теплостойкости, особенно тугоплавких инструментального машиностроительного назначения. Среди них уникальной функциональностью выделяется карбид вольфрама – самый твердый бинарный карбид, сохраняющий эффективный уровень свойств при температурах порядка 1000°C [2]. Поэтому вольфрамокарбидный базис сохраняет приоритетность в современном развитии и наноматериалов инструментального назначения, и соответствующих им нанотехнологий. Температуростойкий карбид вольфрама составляет основу марочного большинства вольфрамосодержащих твердых сплавов [3]. В истории наиболее распространенных промышленных твердых сплавов [4] паспортное содержание карбида вольфрама не ниже 80% для более чем 80% марок.

Повышение износостойкостной функциональности керамики на основе карбида вольфрама в конструкционных и инструментальных применениях объективно связывается с формированием высокоплотных тонкодисперсных структур технологиями порошковой металлургии. Эффективным методом получения таких структур является разработанное в Японии и развиваемое ведущими технологическими державами спарк-плазменное спекание (spark plasma sintering, или SPS в международной научно-литературной практике), использующее прямой нагрев электрическим током исходно порошкового содержимого рабочей камеры консолидации под давлением, сопровождающийся действием электрических разрядов в уплотняемой среде. С оглядкой на собственный и мировой опыт, современным лидером разработки метода в стране приоритета метода SPS (М. Токита) особо выделяется роль электрических разрядов в результатах его применения и в этой связи российский технологический исток (Б. Р. и Н. И. Лазаренко, 1943 г.) в его предтечах [5].

Последующая окончательная обработка спеченной по методу SPS вольфрамокарбидной керамики с одновременным воздействием на ее поверхность электрическими разрядами в процессе алмазно-искрового шлифования (АИШ) позволяет дополнительно улучшить структуру поверхностного слоя с формированием в нем сжимающих остаточных напряжений [6], и тем самым [7] износостойкостную функциональность готового изделия.

Теоретические подходы к аналитическому заданию значений давления в рабочем контакте на операционных этапах жизненного цикла производства изделий порошкового SPS, как собственно спекания, так и постпроцесса окончательного формообразования, в известных литературных и интернетовских источниках до выполняемого в НТУ «ХПИ» и УкрГУЖТ и представленного здесь исследования не рассматривалась.

ОПЫТ SPS ВОЛЬФРАМОКАРБИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В известной практике американо-украинского сотрудничества [8] высокоплотный карбид вольфрама (с относительной плотностью не ниже 98%) как продукт SPS характеризуется достижимым средним размером частиц до 500 нм при содержании менее 0,1 мас.% примесей, за исключением карбида хрома (Cr_2C_3) и карбида ванадия (VC), добавки которых со средним размером зерна до 100 нм и в объеме до 2 мас.% в специальных технологиях SPS производятся для ингибирования роста зерен карбида вольфрама (WC) в процессе их спекания. При среднем размере зерен WC в консолидате SPS до 500 нм их объем с размером св. 2 мкм в конечном продукте не превышает 5 мас.%. Максимальная температура в спекаемом консолидате в реальной практике обеспечивается от 1640°C до 1890°C при варьировании скоростью нагрева и временем выдержки в ступенчатом цикле спекания [8].

Следуя [8], ингибирующая укрупнение зеренной структуры максимальная (2 мас.%) добавка Cr_2C_3 или VC понижает средний размер зерна примерно на 30% (до 350 нм). Достижение среднего размера зерна на уровне примерно 100 нм, также следуя [8] возможно, но при снижении длительности и максимальной температуры спекания (до 1540°C) и сопряжено с понижением плотности получаемого консолидата WC (ниже 98%).

Следует отметить, что содержание патента [8] не позволяет полностью реконструировать используемые им циклы спекания, причем информация по циклограмме давления (кроме максимума 70 МПа) вообще отсутствует как в защищаемой части (формула), так и в описательной, включая примеры. Это затрудняет возможности воспроизводства результатов [8], а также их использования в оценках реалистичности теоретических разработок физических моделей оптимизации SPS по давлению.

Получение высокоплотного карбида вольфрама в контексте [8] и с учетом дополнительного фирменного опыта украинского предприятия ООО «Кермет-У» в разработке и использовании оригинальной установки SPS совместно со специалистами и на научно-производственных площадях ХНУ им. В. Н. Каразина [9], а также композитов на основе WC с участием триоксида диалюминия (Al_2O_3) и др. тугоплавких материалов, представлено в выполненных в УкрГУЖТ исследованиях [10-12]. В [11, 12] – для композитов с участием диоксида циркония (ZrO_2). Из отдельного и расширенного рассмотрения [13] выполненных исследований [10] в части собственно WC следует, что максимальное давление в цикле спекания ограничивалось величиной 50 МПа из прочностных возможностей рабочей камеры (материал – графит марки МПГ-7 ТУ 1915-109-081-2004), а средний размер зерна в структуре спеченного консолидата также весьма зависим от максимальной температуры разогрева камеры, с возрастанием темпа роста при повышении температуры (рис. 1).

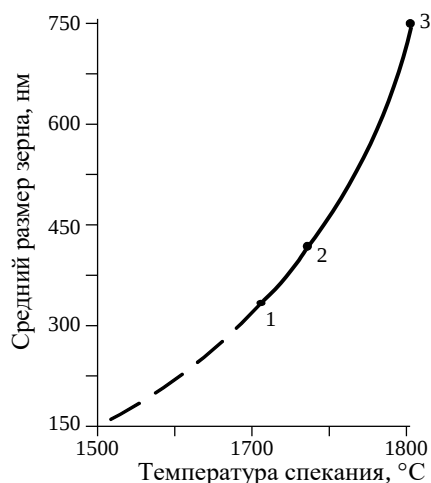


Рисунок 1 – Температура SPS и нанометрия микроструктуры WC

При этом с понижением максимальной термической нагрузки на спекаемый консолидат снижаются его плотность и микротвердость (табл. 1; номера партий образцов соответствуют позициям на рис. 1).

Таблица 1. Характеристики SPS и спеченного WC

Характеристика	Номер партии		
	1	2	3
Температура SPS, °C	1700	1730	1800
Финальное давление SPS, МПа	40	50	50
Относительная плотность, %	96,2	99,0	99,2
Микротвердость, HRA	93	95	95
Прочность при изгибе, МПа	530	720	670
Средний размер зерна, нм	350	420	750

В разработках [8] и [13] использовались нанопорошки WC разных размерностей и производителей, со средним размером зерен примерно 80 нм американского консорциума OMG Americas Inc и в диапазоне 40-70 нм австрийской фирмы Aldrich Co, но и тренды технологической наследственности теплофизики SPS те же, и результаты примерно сопоставимы.

Из тематически избранно реферированной выше опубликованной информации об этих разработках можно судить о финальных давлениях прессования в цикле SPS и средних размерах зеренной структуры полученных консолидатов перед окончательным формообразованием электроэрозионной обработкой (рекомендация [8]; в оригинале – EDM (electrical discharge machining) – с учетом электропроводности WC) или механической обработкой (практика [8] – шлифование алмазными кругами на керамической связке), или электромеханической комбинацией этих видов обработки – АИШ (практика [6]).

Обычное отсутствие в информационных источниках, в том числе зарубежных, указаний на управление давлением в цикле SPS, по-видимому следует связывать как с отражением современного тренда коммерциализации обеспечивающих результаты исследований «ноу-хау», так и со сложившейся некоторой второстепенностью отношения к давлению прессования в цикле SPS по сравнению с характеристиками нагрева.

В реальной практике страны-фундатора SPS (Япония), в том числе внедренческой, установленной в ходе общих дискуссий и частных общений с участием автора на проходившем в рамках международной школы-семинара [5] российско-японском семинаре по SPS, верхний предел давления прессования предпочтителен как можно большим, но сдерживается прочностью, допускаемой материалом рабочей камеры электроконсолидации под давлением, как правило на графитной основе. С учетом запаса на многооперационную работоспособность камеры опытный верхний предел обычно не превышает 40-45 МПа. Заметим, что опыт [8] (70 МПа) приближен к предельно допустимому по сжатию для используемого в конструкции его камеры спекания мелкозернистого плотного графита или МПГ в межотраслевой аббревиатурной идентификации на постсоветском пространстве (80 МПа, [14]).

Некоторые данные о внутрицикловом управлении давлением SPS WC и композитов WC с участием Al_2O_3 и ZrO_2 из опыта работы на установке [9] приведены в исследованиях [10-12], а также в специально посвященной этому работе [15], дополнительно раскрывающей технологические аспекты опыта [10] (табл. 2). Использованные в этих работах порошки ZrO_2 , частично стабилизированного 3 мол. % Y_2O_3 , и Al_2O_3 – производства соответственно Центром конструкционной керамики и инженерного прототипирования при БелГУ (Россия) [11, 12] и Infarmat Corporation (США) [10, 15].

Таблица 2 – Температура и давление в цикле SPS

Состав консолидата [источник информации]	Диапазон средних размеров исходного зерна, нм	Температура, °C Давление, МПа	
		1-я ступень изменения давления	2-я ступень изменения давления
WC [10]	70-90 (Americas Inc)	<u>400-1650</u> 10-45	-
ZrO_2 -10мас.%WC [11, 12]	3-15 (ZrO_2); 40-70 (WC)	<u>До 800</u> 10	<u>800-1400</u> 30
Al_2O_3 -50 мас.%WC [15]	60-80 (Al_2O_3); 40-70 (WC)	<u>300-800</u> 7,5-25	<u>До 1600</u> До 45

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ SPS ПО ДАВЛЕНИЮ

Сообразно первой подаче [16] и современной трактовке [17] авторского подхода к априорному определению режимов давления в компактах SPS исходно порошковых материалов, с позиций создания электрически благоприятных условий разрядному подавлению максимальной пористости, он в основном исходит из известных моделей локальных дефектов сплошности в нанокристаллических материалах [18] и уплотнения материалов с такими дефектами под действием электрического тока [19] с приложением к ним закономерностей Пашена-Пеннинга [20, 21] в процессах под давлением и учетом особенностей токопроводности среды процессирования.

Согласно этому подходу, оптимальное давление прессования P_{opt} при нанопорошковой электроконсолидации подчиняется зависимости вида:

$$P_{\text{opt}} = k \cdot (P \cdot h)_{\text{opt}} / h,$$

где $(P \cdot h)_{\text{opt}}$ – характеристика минимума потенциала зажигания разряда в газе, Па·м; h – размерная характеристика нанопорошка, эквивалентная ожиданию наибольшего разрядного промежутка (диаметр зерна в сферической модели), м; k – поправочный коэффициент, учитывающий геометрию промежутка в порах, состав и теплофизический фон газовой среды в них; в общем случае $k > 0$ и, в частности, с повышенным ожиданием $0 < k < 1$ в исходно нормально влажных средах реального компактирования.

В табл. 3 приведены некоторые результаты расчетов для воздушной среды дефектов сплошности, $(P \cdot h)_{\text{opt}} = 0,8$ Па·м, и причем сухой ($k = 1$).

Таблица 3 – Давление начального подавления пористости в цикле SPS

Состав консолид- дата	Верхн. граница средних размеров зерен исходных порошков, нм	Давление, МПа	
		Расчет	Практика
WC	90 (WC, Americas Inc.)	8,9	10,0
ZrO ₂ -10 мас.%WC	70 (WC, Aldrich Co)	11,4	10,0
Al ₂ O ₃ -50 мас.%WC	80 (Al ₂ O ₃ , БелГУ)	10,0	7,5

В процессе SPS с участием порошков WC в составе консолидата дополнительно продуцируется семикарбид W₂C, образование которого при электроконсолидации WC в графитовых камерах SPS технологически неизбежно [22], что подтверждено и входным фазовым анализом [6, с. 152] перед последующим АИШ спеченного вольфрамокарбидного продукта.

Заметная усадка консолидата, а с ней и заметное подавление пористости, по экспериментальным данным SPS WC [10] начинается с 800-900°C. Поэтому особый интерес с точки зрения анализируемой гипотезы об электроразрядных эффектах формирования высокоплотных продуктов SPS привлекает сопоставление расчетной рекомендации начального давления для консолидата в исходном температурном состоянии (средний размер зерна от производителя спекаемого порошка) и для его состояния при температуре заметной усадки. Однако отсутствие экспериментальных данных о среднем размере зерна при нагреве консолидата до 800-900°C не позволяет сделать это. Давление же в этой фазе нагрева при его плавном увеличении ([10], см. табл. 2) составляет 21-24 МПа, т. е., с учетом близости расчетной оценки и экспериментальной практики начального давления (см. табл. 3), можно предположить, что размер преимущественно определяющих неплотность консолидата WC локализаций пористости при его нагреве до 900°C при SPS составляет примерно 30-40 нм.

Тенденция к опережающему темп роста температуры спекания темпу роста среднего размера зерна консолидата (рис. 1) в некоторых задачах функциональной приоритетности более тонкой структуры результата SPS, нежели его повышенной плотности, побуждает сокращать цикл SPS с достижением экономической эффективности как в производстве изделий из порошковой керамики, за счет снижения его энерго- и трудоемкости, так и в их эксплуатации. WC керамика SPS является характерным примером этому. Многозвенной формулой патента [8, п. 2] защищаются рассматриваемые здесь высокоплотные структуры WC керамики SPS с относительной плотностью $\geq 98\%$ и полумикронным верхним пределом среднего размера зерна в практическом отсутствии ингибирующих его рост добавок Cr₂C₃ и VC (суммарно менее чем 0,1мас.%), см. характеристику 2-й партии образцов по табл. 1. В описательной части патента [8, пример 3 «Cutting Tool from Nanosized WC»] показано, что WC продукт SPS с пониженной финальной температурой спекания (1540°C) и, очевидно поэтому, относительной плотностью $< 98\%$, тем не менее, благодаря заметно более мелкозернистой структуре (со средним размером зерна порядка 100 нм), после последующего формообразования в режущую пластину шлифованием, причем без оценки его технологической наследственности в характеристике зеренной размерности структуры

шлифованного WC, при тестовом высокоскоростном (200 м/с) точении штамповой стали X12M с продольной подачей 0,32 мм/с и глубиной 0,2 мм показывает значительно более высокую износостойкость, в 1,6 раза (с 91 мин до 146 мин), по сравнению с использованием в сопоставимом тестировании подпадающего под патентную защиту [8] решения инструментального WC материала, характеризующегося следующими финальными характеристиками SPS: температура спекания 1630°C, относительная плотность 98,7%, средний размер зерна порядка 500 нм.

В связи с этим обращает внимание установленная [11, 12] в композите ZrO_2 -10мас.%WC экстремальная зависимость относительной плотности консолидата от температуры SPS (табл. 4). Если аналогичный максимум предела прочности при изгибе с общей координатой экстремума по шкале температуры SPS вполне объясним известным [23] переходом более плотной тетрагональной фазы преобладающего в композите ZrO_2 , частично стабилизированного Y_2O_3 , в менее плотную моноклинную, то сохраняющийся тренд роста размера зерна, причем с повышением интенсивности аналогично показанному для WC на рис. 1, затрудняет физическое объяснение понижения относительной плотности композита с ростом температуры SPS.

Таблица 4 – Характер изменения относительной плотности композита ZrO_2 -10мас.%WC от температуры SPS [11, 12]

Температура SPS, °C Средний размер зерна, мкм	Относительная плотность, %
1250 0,25	0,97
1300 0,4	0,99
1400 0,8	0,95

К тому же известная открытая пористость графитов типа МПГ [14] камер спекания побуждает принимать во внимание возможность вытеснения в нее газовых структур из закрытых пор спекаемых под давлением консолидатов при их уплотнении, активированном фазовым переходом в менее плотную структуру и ростом температуры SPS. При этом масса единицы объема консолидата уменьшается, что может приводить к ошибкам основанного на взвешивании механистического подхода к расчету относительной плотности усаженного консолидата.

Вместе с тем от воспроизводимости подобных результатов и их адекватного физического объяснения можно было бы ожидать появления новых технологий и материалов тугоплавкой композиционной керамики с повышенными эксплуатационными свойствами, но приведенные в табл. 4 результаты [11, 12] конфликтуют с показанными там же данными об общей пористости композитов вида ZrO_2 -Xмас.%WC, где X = 10, 20, 30: для всех X повышению температуры SPS в исследуемых пределах 1250-1400°C неизменно соответствует ее снижение.

ПРИЛОЖЕНИЕ МОДЕЛИ К АИШ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ПОСЛЕ SPS

Об опыте НТУ «ХПИ» по АИШ WC после его SPS научная общественность наиболее широко информирована учебным пособием [24], в основу которого положены материалы [6]. Поскольку авторы [24] в своих работах [6, 25 и др.] технологическое происхождение вольфрамокарбидного сплава, обрабатываемого ими методом АИШ, связывают исключительно с источником [8], то его исходное после SPS состояние зеренной структуры здесь также связывается с данными [8], частично представленными в табл. 1.

Это вызвано отсутствием в базовом для АИШ WC исследовании [6] информации о входном размерном контроле исходной зеренной структуры и необъяснимой авторами [6] идеализацией обрабатываемого сплава WC в этой части. В первом и единственном численно конкретизированном упоминании [24, с. 47] указывается, что она состоит «только из зерен WC, имеющих размеры до 100 нм; исходный материал до прессования по специальной технологии

представлял порошок WC с размерами 40-75 нм». Однако в [8] не приводятся какие-либо сведения о подобном успехе в спекании порошков WC. Этот факт, впрочем, возможно объясним авторским предположением соответствующему разделу [24] эпиграфа от известного мировоззренческой утилитарностью Клода Адриана Гельвеция: «Знание некоторых принципов легко возмещает незнание некоторых фактов».

К несомненно значимым научным ценностям исследования [6] принадлежит выявленный факт экстремальной (с максимумом) зависимости эксплуатационно благоприятных напряжений сжатия в полученном SPS WC с относительной плотностью порядка 96-99% (табл. 1) в результате его АИШ с некоторым заданным усилием прижима шлифовального круга к обрабатываемой поверхности.

Тогда, согласно обозначенному ранее [26] единому подходу к априорному определению режимов давления в рабочих формообразующих контактах SPS и АИШ после SPS с позиций создания электрически благоприятных условий разрядному подавлению максимальной пористости, выявленному [24] оптимальным (или близким к оптимальному, с учетом ступенчатости управления давлением прижима шлифовального круга к поверхности обработки в экспериментах [24]) механическому давлению (1,2 МПа) соответствует минимизация напряжения пробоя в межэлектродном промежутке, размерно эквивалентном среднему диаметру зерна 0,67 мкм. Или, в диапазоне регулирования 0,4-1,6 МПа [24], – диапазону 0,5-2,0 мкм, что на границах диапазона размеров зерен точно соответствует среднему (0,5 мкм) и максимальному (2,0 мкм) результатам наблюдений после реализации основной технологии SPS, выделенным многозвенной формулой патента [8, пп. 2, 4].

Общность эффектов эксплуатационно благоприятного уплотнительного реструктурирования WC электроразрядными технологиями SPS и АИШ в контексте [22] подтверждает также рентгенографически установленное [6] заметное дополнительное повышение семикарбидной фазы W_2C в процессе АИШ с формированием повышенного уровня сжимающих напряжений в поверхностном слое вольфрамокарбидного материала в результате действия множественных электроразрядных актов и микрорезания алмазными зернами шлифовального круга в его комбинированном электромеханическом формообразующем контакте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование впервые представляет расчеты и расширенную числовую интерпретацию данных циклограмм прессования при SPS для группы вольфрамокарбидных материалов в контексте модели пористости консолидата и приложения к ней закона Пашена-Пеннинга. Ранее такие расчеты были выполнены и впервые представлены [16] весьма обобщенно, с последующей конкретизацией [27] только для SPS равновесной композиции WC- Al_2O_3 .

Таблица 5 – Расчетное давление прижима круга АИШ композитов SPS

Композит [источник информации]	Средний размер зерна перед АИШ, мкм	Расчетное давление, МПа
WC-2мас.%Cr ₂ C ₃ [8]	0,35	2,3
WC-2мас.%VC [8]		
ZrO ₂ -10мас.%WC [11, 12]	0,4	2,0
Al ₂ O ₃ -50 мас.%WC [15]	0,5	1,6

Выявленная связь рационального давления в рабочих контактах SPS и АИШ с размером зеренной структуры материала предоставляет возможность прогнозирования оптимальных усилий прессования и шлифования на стадии проектирования технологических процессов получения высокоплотных и высокотвердых тонкодисперсных керамических структур повышенной функциональности (табл. 5). Такие расчеты выполнены и представлены впервые.

Результаты исследований указывают на то, что оптимальный режим SPS по критерию максимальной функциональной эффективности конечного изделия должен определяться с учетом

последующей окончательной обработки. В технологических маршрутах SPS-АИШ – с учетом теплофизической общности обеих операций, структурирование процессируемого материала в которых осуществляется под механическим давлением и влиянием разрядных эффектов электрического тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science / Ed. by M. C. Roco and W. S. Bainbridge. – Arlington VA: NSF, 2002 [June]. – 424 p. – Режим доступа: <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/1/NBIC-report.pdf>. Дата обращения: 05.04.2016.
2. Болгар А. С. Термодинамические свойства карбидов / А. С. Болгар, А. Г. Турчанин, В. В. Фесенко. – К.: Наук. думка, 1973. – 270 с.
3. Панов В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: Учебное пособие для вузов / В. С. Панов, А. М. Чувилин. – М.: МИСиС, 2001. – 432 с.
4. Либенсон Г. А. Производство порошковых изделий: Учеб. для техникумов / Г. А. Либенсон – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
5. Tokita M. Recent Advanced Spark Plasma Sintering (SPS): Technology, Systems and Applications in Japan [электронный ресурс]: доклад [тезисы] / М. Tokita // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», ЛЭМППМ, 20-23 мая 2013 г. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – Электрон. дан. (65 с.: 9987534 байт). – Режим доступа: <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf>. Дата обращения: 01.04.2016.
6. Стрельчук Р. М. Определение особенностей и рациональных условий алмазно-искрового шлифования твердых сплавов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Р. М. Стрельчук; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Харьков, 2011. – 193 с.
7. Фукс М. С. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовской обработки / М. С. Фукс, Н. К. Беззубенко, Б. М. Свердлова. – К.: Вища шк., 1979. – 160 с.
8. Kodash V. Yu. Tungsten carbide cutting tool materials / V. Yu. Kodash, E. S. Gevorkyan. United States Patent No.6617271, Sept. 9, 2003.
9. Геворкян Е. С. Пристрій для гарячого пресування порошків шляхом прямого пропускання електричного струму: патент на корисну модель № 72841 Україна: МПК (2012.01) B22F 3/00 / Е. С. Геворкян, М. О. Азаренков, С. В. Литовченко и др. – № u 2012 03031, заявл. 15.03.12; опубл. 27.08.12, Бюл. №16.
10. Геворкян Э. С. Плотные и пористые конструкционные материалы из нано и субмикронных порошков WC, Al₂O₃ и SiC полифункционального назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.11 – технология тугоплавких неметаллических материалов / Э. С. Геворкян; Укр. гос. акад. ж.-д. трансп. – Харьков, 2008. – 289 с.
11. Мельник О. М. Композиционные высокопрочные, износостойкие материалы полифункционального назначения на основе нанопорошков ZrO₂: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 – технология тугоплавких неметаллических материалов / О. М. Мельник; Укр. гос. акад. ж.-д. трансп. – Харьков, 2014. – 197 с.
12. Дослідження особливостей отримання та компактування нанодисперсних складових багатокомпонентних матеріалів: Звіт про НДР (заключн.) / Укр. держ. ун-т заліз. трансп.; кер. Е. Геворкян. – Харків, 2015. – 197 с. – № ДР 0113U001340. – Инв. № 0216U000350.
13. Геворкян Э. С. Некоторые закономерности горячего прессования нанопорошков монокарбида вольфрама / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2008. – № 35. – С. 44-48.
14. Виргильев Ю. С. Графиты для реакторостроения / Ю. С. Виргильев. – М.: ФГУП «НИИграфит», 2011. – 89 с.
15. Геворкян Э. С. Подбор оптимальных режимов горячего прессования нанопорошковых смесей Al₂O₃–WC для инструментальных применений / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 5/1(47). – С. 13-18.
16. Геворкян Э. С. Особенности и место электроконсолидации прямым действием переменного тока в системе методов субмикро- и нанопорошкового спекания под давлением / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2010. – № 49. – С. 144-161.
17. Гуцаленко Ю. Г. Физико-математическая модель прессования в процессах консолидации порошков методом спарк-плазменного спекания / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харк. політехн. ін-т": 36. наук. пр. Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 18 (1127). – С. 44-53.
18. Schaefer, H.-E. Interfaces and Psysical Properties of Nanostructured Solids / H.-E. Schaefer // Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. of Materials Having Ultrafine Microstructure: Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. Porto Novo, Portugal. June 28 – July 10, 1992. / Ed. by M. Nastasi, Don M. Parkin and H. Gleiter. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. – NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences – Vol. 233. – PP. 81-106.

19. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
20. Paschen, F. Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz / F. Paschen // *Annalen der Physik und Chemie*. – 1889. – Nr. 5 (273). – SS. 69-96.
21. Penning, F. M. *Electrical Discharges in Gases* / F. M. Penning. – New York: Macmillan, 1957. – 118 p.
22. Геворкян Э. С. Генезис экспансии семикарбида вольфрама в вольфрамокерамических инструментальных композитах горячего прессования с электроконсолидацией нанопорошков на монокристаллической основе / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // *Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – 2010. – № 53. – С. 19-30.
23. Lange, F. F. Transformation-Toughened ZrO_2 : Correlation between Grain Size Control and Composition in the System ZrO_2 - Y_2O_3 / F. F. Lange // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1986. – Vol. 69, Iss. 3. – PP. 240-242.
24. Узунян М. Д. Шлифование наноструктурных твердых сплавов: Учеб. пособие / М. Д. Узунян, Р. М. Стрельчук. – Харьков: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2015. – 182 с.
25. Узунян М. Д. Наноструктурные твердые сплавы – особенности шлифования, качество и его стоимостная оценка / М. Д. Узунян, Р. М. Стрельчук. – // *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 81. – С. 273-288.
26. Гуцаленко Ю. Г. Теория и практика оптимальной организации электроразрядных технологий спекания под давлением и алмазного шлифования порошковых материалов с высокоплотной структурой / Ю. Г. Гуцаленко // *Современная наука: проблемы, инновации, решения: Материалы междунар. науч.-практ. конф.* (Курск, 27-28 февр. 2014 г.). / Курск. ин-т социал. образования (филиал) РГСУ, инженер.-техн. фак. – Курск: ООО «Учитель», 2014. – С.36-39.
27. Гуцаленко Ю. Г. Определение рационального давления прессования при нанопорошковой электроконсолидации / Ю. Г. Гуцаленко // *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип.1 (21). – С. 50-61.

REFERENCES

1. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Ed. by M. C. Roco and W. S. Bainbridge. Arlington VA, NSF, June 2002, 424 p. Web. 5 April 2016 <<http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/1/NBIC-report.pdf>>.
2. Bolgar, A. S., A. G. Turchanin, and V. V. Fesenko. *Termodinamicheskie svoystva karbidov* [Thermodynamic properties of carbides]. Kiev, Naukova dumka, 1973, 270 p.
3. Panov, V. S., and A. M. Chuvilin. *Tehnologija i svoystva spechennyh tverdyh splavov i izdelij iz nih* [Technology and properties of sintered hard alloys and products from them]. Moscow, MISiS, 2001, 432 p.
4. Libenson, G. A. *Proizvodstvo poroshkovykh izdelij* [Production of powder products]. Moscow, Metallurgiya, 1990, 240 p.
5. Tokita, M. "Recent Advanced Spark Plasma sintering is (SPS): Technology, Systems and Applications in Japan". 2-ja mezhdunarodnaja shkola-seminar «Perspektivnye tehnologii konsolidacii materialov s primeneniem jelektromagnitnykh polej» [2nd International Scientific Workshop "Advanced Technologies of Electromagnetic Field Assisted Consolidation of Materials"]. Laboratory of Electromagnetic Field-Assisted Methods for Processing of Novel Materials, National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, 20-23 May 2013, 65 p. Web. 1 April 2016. <<http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf>>.
6. Strel'chuk, R. M. *Opredelenie osobennostej i racional'nykh uslovij almazno-iskrovogo shlifovanija tverdyh splavov iz nanorazmernih zeren monokarbida vol'frama* [Defining characteristics and rational conditions of diamond-spark grinding of hard alloys of nano-sized grains of tungsten monocarbide]. Master's dissertation of technical sciences. Kharkov, 2011, 193 p.
7. Fuks, M. S., N. K. Bezzubenko, and B. M. Sverdlova. *Sostojanie poverhnostnogo sloja materialov posle almaznoj i jel'borovoj obrabotki* [Condition of the surface layer of materials after diamond and CBN processing]. Kiev, Vishha shkola, 1979, 160 p.
8. Kodash, V. Yu., and E. S. Gevorkyan. Tungsten carbide cutting tool materials. United States Patent No.6617271, Sept. 9, 2003.
9. Gevorkyan, E. S., et al. *Pristrij dlja garjachogo presuvannja poroshkov shljahom prjamogo propuskannja elektrichnogo strumu* [Device for hot-pressing of powders by direct transmission of electric current]. Utility Patent No.72841 Ukraine. IPC, 2012.01 B22F 3/00, No. u 2012 03031, Appl. 15.03.2012, Publish. 27.08.2012, Bull. No. 16.
10. Gevorkyan, E. S. *Plotnye i poristyje konstrukcionnye materialy iz nano i submikronnykh poroshkov WC, Al_2O_3 i SiC polifunkcional'nogo naznachennja* [Dense and porous constructional materials from nano and submicron powders of WC, Al_2O_3 and SiC for multifunctional purpose]. Doctoral dissertation of technical sciences. Kharkov, 2008, 289 p.
11. Mel'nik, O. M. *Kompozicionnye vysokoprochnye, iznosostojkie materialy polifunkcional'nogo naznachennja na osnove nanoporoshkov ZrO_2* [Composite high-strength, wear-resistant materials with multifunctional purpose based on ZrO_2 nanopowders]. Master's dissertation of technical sciences. Kharkov, 2014, 197 p.

12. Doslidzhennja osoblivostej otrimannja ta kompaktuvannja nanodispersnih skladovih bagatokomponentnih materialiv [Investigation of peculiarities of receiving and compacting the nanopowder components of multicomponent materials]: Research report (final). Chief E. Gevorkyan. Kharkov, Ukrainian State University of Railway Transport, 2015, 197 p.
13. Gevorkyan, E. S., and Yu. G. Gutsalenko. "Some regularities of hot pressing of monocarbide tungsten powders". Visnyk NTU "KhPI". 2008, No. 35, pp. 44–48.
14. Virgil'ev, Yu. S. Grafity dlja reaktorostroenija [Graphite for reactor engineering]. Moscow, FGUP «NIIgrafit», 2011. 89 p.
15. Gevorkyan, E. S., and Yu. G. Gutsalenko. "Selection of the optimal modes of hot pressing the Al_2O_3 -WC nano powder mixtures for instrumentation applications". Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologiy. 2010, No. 5/1(47), pp. 13–18.
16. Gevorkyan, E. S., and Yu. G. Gutsalenko. "Features and a place of electric consolidate by the AC direct action in the system of the methods of the submicron and nanopowder sintering under pressure". Visnyk NTU "KhPI". 2010, No. 49, pp. 144–161.
17. Gutsalenko, Yu. G. "Physical and mathematical model of pressing in processes of consolidation the powders by spark-plasma sintering". Visnyk NTU "KhPI". 2015, No. 18, pp. 44–53.
18. Schaefer, H.-E. "Interfaces and Psysical Properties of Nanostructured Solids". Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure. of Materials Having Ultrafine Microstructure. Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructure, Porto Novo, Portugal, June 28 – July 10, 1992. Ed. by M. Nastasi, Don M. Parkin and H. Gleiter. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences – Vol. 233 (1993), pp. 81-106.
19. Raychenko, A. I. Osnovy protsessa spekaniya poroshkov propuskaniyem elektricheskogo toka [Fundamentals of the process of sintering of powders by passing an electric current]. Moscow, Metallurgiya, 1987, 128 p.
20. Paschen, F. "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure beiverschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz". Annalen der Physik und Chemie. No. 5 (1889), pp. 69–96.
21. Penning, F. M. Electrical Discharges in Gases. New York, Macmillan, 1957, 118 p.
22. Gevorkyan, E. S., and Yu. G. Gutsalenko. " Genesis expansion of tungsten semicarbide in tungsten ceramic tool composites of hot pressing with electrical consolidation of nanopowders based on monocarbide". Visnyk NTU "KhPI". 2010, No. 53, pp. 19–30.
23. Lange, F. F. "Transformation-Toughened ZrO_2 : Correlation between Grain Size Control and Composition in the System ZrO_2 - Y_2O_3 ". J. Am. Ceram. Soc. Vol. 69 (1986), Iss. 3, pp. 240-242.
24. Strel'chuk, R. M., and M. D. Uzunjan. Shlifovanie nanostrukturnyh tverdyh splavov [Grinding of nanostructured hard alloys]. Kharkov, Izd-vo «Pidruchnik NTU "KhPI"», 2015, 182 p.
25. Uzunjan, M. D., and R. M. Strel'chuk. "The nanostructured hard alloys – features of grinding, quality and valuation". Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. 2012, Iss. 81, pp. 273-288.
26. Gutsalenko, Yu. G. "Theory and practice of the optimal organization of electric discharge sintering technology under pressure and diamond grinding of powder materials with high density structure". Covremennaja nauka: problemy, innovacii, reshenija. Proc. of the international scientific-practical conference (Kursk, 27-28 February 2014). Kursk, Uchitel' Co, Ltd., 2014, pp. 36-39.
27. Gutsalenko, Yu. G. "Defining of rational pressure when nano powder electrical consolidation". Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. 2011, Iss. 1, pp. 50-61.

УДК [681.5:519.245]:621.92

БИНОМИАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.П. Долгин¹, И.В. Долгин²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация² ООО «РМ – Терекс», Москва, Российская федерация

Получена: 16.03.2016 Принята: 25.03.2016

Аннотация

Предложен метод коррекции динамической системы управления. Метод основан на биномиальном представлении требуемой передаточной функции. Выполнена аппроксимация характеристического полинома передаточной функции корректируемой системы биномиальным многочленом. Получено описание корректирующего звена отрицательной обратной связи. Показано, что введение корректирующего звена в цепь отрицательной обратной связи обеспечивает абсолютную устойчивость и гарантирует апериодический характер переходного процесса динамической системы. Система сохраняет устойчивость при случайном дрейфе ее параметров. В качестве примера рассмотрена система управления режимом процесса шлифования.

Ключевые слова: динамическая система, коррекция, переходная характеристика, устойчивость, качество, передаточная функция.

BINOMIAL CORRECTION OF THE STOCHASTIC SYSTEMS

V.P. Dolgin¹, I.V. Dolgin²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² LTD. „RM – Tereks“, Moscow, Russian federation

Received: 16.03.2016 Accepted: 25 .03.2016

Abstract

The method of correction of the dynamic system of control is offered. A method is based on binomial presentation of the required transfer function. Approximation of characteristic polynomial of transfer function of the corrected system is executed by a binomial polynomial. Description of correcting link of negative feed-back is got. It is shown, that introduction of correcting link to the chain of negative feed-back provides absolute stability and guarantees the quality of transitional process of the dynamic system. The system saves stability at the accidental drift of its parameters. As an example the system of control by the mode of process of polishing is considered.

Keywords: dynamic system, correction, transitional description, stability, quality, transfer function.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов обеспечения устойчивости систем управления является ввод корректирующих звеньев, изменяющих динамические свойства корректируемой системы [1 – 8]. Структура и параметры корректирующих звеньев выбираются на основании анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) корректируемой системы и ее сравнения с желаемой АЧХ. Разработаны методы параллельной, последовательной и параллельно-последовательной видов коррекции, обеспечивающих заданные запасы устойчивости по амплитуде и фазе, которые, однако, не позволяют оценить допустимую величину дрейфа параметров системы, и не исключают перерегулирование. Обеспечение требуемого качества работы системы в этом случае является отдельной самостоятельной задачей.

Цель статьи – определение структуры и параметров корректирующей функции, позволяющей обеспечить устойчивость системы в заданном диапазоне дрейфа ее параметров при максимально возможном качестве и быстродействии.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Формулировка проблемы. Качество работы системы определяется величиной перерегулирования. Исключение перерегулирования предполагает реализацию апериодического переходного процесса, что определяет структуру желаемой передаточной функции. Во избежание

перерегулирования желаемая передаточная функция должна состоять из комбинации элементарных звеньев первого порядка. Быстродействие системы зависит от постоянных времени комбинации элементарных звеньев. Одновременное выполнение требований максимально возможного качества и максимального быстродействия сводится к проблеме выбора постоянных времени звеньев, образующих систему.

Структура системы коррекции изображена [7, 8] на рис. 1, где обозначено: X – входной сигнал, Y – выходной сигнал, K – требуемый коэффициент передачи (усиления), W_x – корректируемая система, W_s – звено обратной связи, W_o – система с включенной обратной связью, W_k – звено коррекции, W – скорректированная система.

Приведенная на (рис. 1) блок-схема позволяет представить описание передаточных функций в следующем виде:

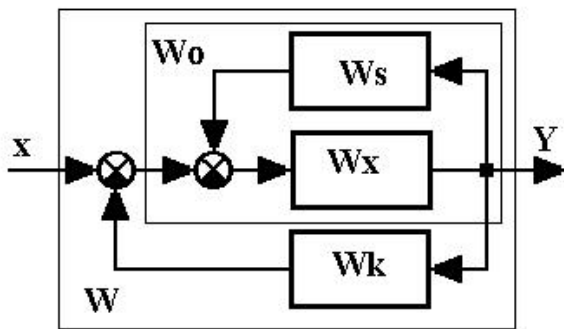


Рисунок 1 – Блок-схема процедуры коррекции

$$W(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)W_k(p)};$$

$$W_0(p) = \frac{W_x(p)}{1 + W_x(p)W_s(p)};$$

$$W_x(p) = \frac{W_c(p)}{W_z(p)};$$

$$W_s(p) = \frac{K_s}{1 + pT_s};$$

$$W_k(p) = \frac{1}{W_g(p)} - \frac{1}{W_k(p)} - W_s(p);$$

$$W_r(p) = W_z(p)(W_z(p)(1 + pT_s) + W_c(p)K_s);$$

$$W_g(p) = \frac{K}{(1 + pT_g)^g},$$

где $W_c(p)$ и $W_z(p)$ – полиномы числителя и знаменателя степени m и n соответственно, K_s и T_s – коэффициент передачи и постоянная времени звена $W_s(p)$, а g и T_g – показатель степени и постоянная времени требуемой передаточной функции $W_g(p)$. Показатель степени g необходимо принять равным степени характеристического полинома $W_r(p)$ передаточной функции $W_0(p)$, а постоянная времени T_g в этом случае будет равна корню степени g из коэффициента при старшем члене характеристического полинома передаточной функции $W_0(p)$.

Рассмотрим пример реализации изложенной методики. Зададим составляющие передаточной функции корректируемой функции $W_x(p)$, положив

$$W_c(p) = \prod_{i=1}^n (1 + b_i p);$$

$$W_z(p) = \sum_{j=1}^m (a_j p)^j.$$

С помощью генератора случайных чисел присвоим значения переменным $T_s = 5,2$; $a = [0,42; 5,6; 7,7; 0,80; 2,4]$, $b = [2,7; 4,9; 1,5; 3,3; 3,4; 6,8; 5,9; 7,2]$. Зададим значения $K = 2$; $m = 5$; $n = 8$. Найдя степень $g = \text{degree}(W_r) = 13$ и значение коэффициента при старшем

члене характеристического полинома $W_r(p)$ передаточной функции $W_o(p)$ $c_g = \text{coeff}(W_r, p, g)$, определим требуемое значение постоянной времени $T_g = \sqrt[3]{c_g} = 3,3$.

На рисунке 2 показано распределение корней $W_r(p)$ и характеристического полинома передаточной функции $W(p)$.

Благодаря введенной коррекции все корни характеристического полинома передаточной функции $W(p)$ являются вещественными отрицательными равными $-T_g^{-1}$ (на рис. 2 изображено символом ■), что свидетельствует об устойчивом состоянии системы после введения коррекции. Остальные корни (обозначены символом ○) принадлежат характеристическому полиному корректируемой системы до введения коррекции, четыре из которых лежат в правой полуплоскости, свидетельствуя о неустойчивом состоянии системы.

Анализ реакции на шум. В процессе эксплуатации система подвергается внешним возмущениям, связанным с изменением условий работы (климатическим, температурным от разогрева узлов, например, при изменении условий теплоотвода в процессе механической обработки и др.). Кроме того, износ, старение и другие явления приводят к изменению коэффициентов передаточной функции, являются причиной дрейфа характеристик и снижения устойчивости системы. Учет этих многочисленных факторов вызывает затруднения. Введение коррекции снижает риск ухудшения качества работы системы.

С целью исследования поведения системы при отклонении параметров значения коэффициентов, входящих в выражение передаточной функции $W_x(p)$, изменялось по случайному закону в интервале $\pm E$, где $E < 1$ – относительное изменение параметра, для числителя $W_c(p)$ $b_j = b_j(1 + \xi_j)$; $j = [1, n]$; $\xi_j \in \{-E, E\}$ и знаменателя $W_z(p)$ $a_i = a_i(1 + \xi_i)$; $i = [1, m]$; $\xi_i \in \{-E, E\}$ как по отдельности, так и одновременно.

При изменении указанных параметров до $\pm 50\%$ и более устойчивость системы не нарушалась. По мере роста шумовой составляющей увеличивалось перерегулирование, переходный процесс переходил в колебательный и сопровождался увеличением времени затухания.

На рис. 3 показано распределение корней $W_r(p)$ характеристического полинома передаточной функции $W(p)$ после введения коррекции при одновременном воздействии шумовой составляющей на коэффициенты числителя $W_c(p)$ и знаменателя $W_z(p)$.

Иллюстрация влияния шумовой составляющей на переходную характеристику системы после введения коррекции представлена (рис. 4).

При отсутствии шумовой составляющей переходная характеристика (обозначена 4) имеет апериодический характер. Цифрой 1 обозначена характеристика при изменении коэффициентов числителя, цифрой 2 – изменении коэффициентов знаменателя, цифрой 3 – одновременном изменении коэффициентов числителя и знаменателя в границах диапазона $E = \pm 0,3$. Символом $\mathfrak{E}$ обозначена кривая динамической погрешности $\mathfrak{E}(t)$.

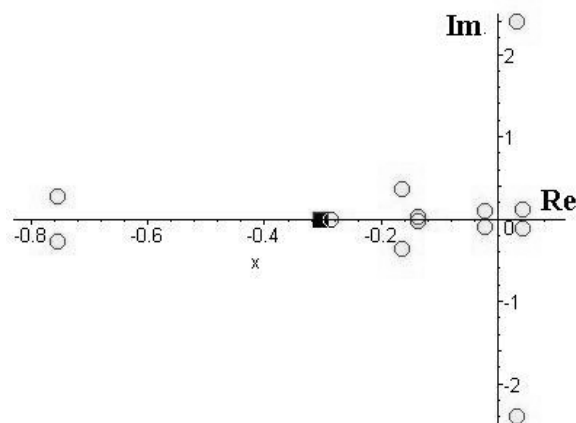


Рисунок 2 – Расположение корней характеристического полинома до введения коррекции

определим $W_c(p) = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5$ и $W_z(p) = (1 + T_1 p)(1 + T_m p + T_e T_m p^2)(1 + T_q p)^q$.

Получим передаточную функцию звена обратной связи

$$W_s(p) = \frac{K_6 K_7}{1 + T_7 p}.$$

Введя параметры звеньев $K_1=0,9$; $K_2=2,5$; $K_3=0,04$; $K_4=4/(2\pi)$; $K_5=0,9$; $K_6=0,05$; $K_7=0,05$; $q=3$; $T_1=0,03$; $T_e=0,08$; $T_m=0,03$; $T_5=0,01$; $T_7=0,02$; $T_q=T_5/q$, определим порядок бинома $g=7$ и постоянную времени $T_g=0,0127$.

На рис. 6 изображены кривые установившегося (1) и переходного процессов до введения коррекции (2), при отсутствии шумовой составляющей (3), при воздействии шума (4) в границах диапазона $E = \pm 0,3$ и кривая динамической погрешности $\varepsilon(t)$.

Выводы

Предложенный метод обеспечивает аperiодический характер переходного процесса, обеспечивая максимально возможный запас устойчивости. При случайном дрейфе параметров система сохраняет устойчивость. Ввод коррекции повышает качество переходного процесса, устраняя перерегулирование.

Обсуждение результатов. Рассмотрены два крайних случая коррекции системы с нулевым порядком числителя операторной передаточной функции и с порядком числителя операторной передаточной функции превышающем порядок знаменателя, что свидетельствует об универсальности предложенного метода коррекции. Реализация метода отличается простотой, не требуя дополнительных исследований положения фазочастотной характеристики относительно частоты среза амплитудно-частотной характеристики, построения асимптотических логарифмических характеристик входящих в систему звеньев. Ввод коррекции повышает быстродействие системы, уменьшая время регулирования, что видно из сравнения переходных характеристик, полученных для корректируемой системы шлифования до и после ввода коррекции (рис. 6, кривые 2 и 3 соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. – М.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
2. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. изд. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2007. – 752 с.
3. Власов К.П. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. «Автоматизация и управление» / К.П. Власов. – Харьков: Гуманитарный Центр, 2007. – 526 с.
4. Долгин В.П. Анализ и синтез динамических систем. Монография. / В.П. Долгин, В.А. Ксенофонтова. – Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 410 с.
5. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. / Пер. с англ. В.П. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
6. Топчиев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю.И. Топчиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
7. Долгин В.П. Процедура динамической коррекции линейной системы / В.П. Долгин, И.В. Долгин // Электронное моделирование. – Киев, 2014. – Т. 36. – №2. – С. 81 – 89.
8. Долгин В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими системами и объектами. Численные методы анализа и синтеза систем и объектов / В.П. Долгин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 320 с.
9. Новоселов Ю.К. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Е.Ю. Татаркин; Под ред. А.В. Королева. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1988. – 128 с.

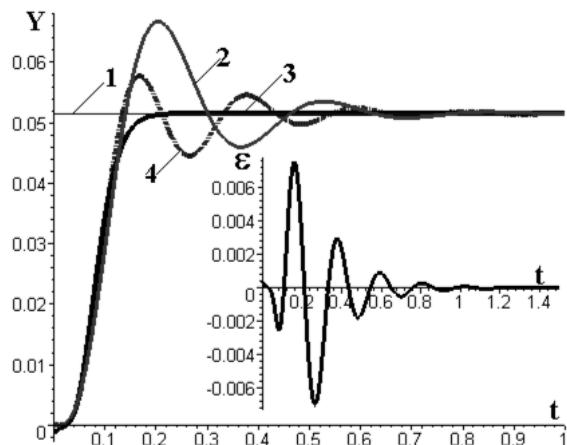


Рисунок 6 – Переходные характеристики график погрешности при разных уровнях шума

10. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
11. Братан С.М. Стохастическая диагностика взаимодействия инструмента и заготовки при точении / С.М. Братан Ю. О. Стреляная, П. А. Новиков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №30, 2012. – С 41–51.
12. Братан С.М. Обеспечения стабильности параметров качества изделий за счет разработки сис тем адаптивного управления / С.М. Братан Ю. О. Стреляная, М.Г. Ступко //Вестник СевНТУ. Вып. 139: Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. / Редкол.: С.М. Братан (отв. Ред.) и др.; Севастоп. Нац. Техн. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – С. 22-27
13. Bratan S.M., Sidorov D., Gutsalenko Y. Synthesis of model the luenberger observer for external cylindrical grinding process Fiabilitate si Durabilitate – fiability & Durability Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu, Supplement no 1
14. Пат. 103636 Украина, МПК G05B 19/18. Шлифовальный станок Заявитель и патентообладатель СевНТУ. – № а201106170; заяв. 17.05.2011; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. / Долгин В.П., Братан С.М., Крылов И.В., Каинов Д.А.
15. Пат. 83619 Украина, МПК 2006 G05B 11/01. Система коррекции нестационарного динамического объекта Заявитель и патентообладатель СевНТУ. – № 20040605149; заяв. 29.06.2004; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15. / Долгин В.П.,

REFERENCES

1. Voronov A.A. Osnovy teorii avtomati-cheskogo upravleniia. Osobyie lineinye i nelinei-nye sistemy. – М.: Energoizdat, 1981. – 304 s.
2. Besekerskii V.A. Teoriia sistem avto-maticheskogo upravleniia: ucheb. izd. / V.A. Besekerskii, E.P. Popov. – 4-e izd. pererab. i dop. – SPb.: Professii, 2007. – 752 s.
3. Vlasov K.P. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia: ucheb. posobie dlia stud. vuzov, obuch. po napr. «Avtomatizatsiia i upravlenie» / K.P. Vlasov. – Khar'kov: Gumanitarnyi Tsent, 2007. – 526 s.
4. Dolgin V.P. Analiz i sintez dinamicheskikh sistem. Monografiia. / V.P. Dolgin, V.A. Ksenofontova. – Izdatel': LAP LAMBERT Aca-demic Publishing, 2013. – 410 s.
5. Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravleniia. / Per. s angl. V.P. Kopylova. – М.: Laboratoriia bazovykh znaniy, 2002. – 832 s.
6. Topcheev Iu.I. Atlas dlia proektirovaniia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia / Iu.I. Topcheev. – М.: Mashinostroenie, 1989. – 752 s.
7. Dolgin V.P. Protsedura dinamicheskoi korrektsii lineinoi sistemy / V.P. Dolgin, I.V. Dolgin // Elektronnoe modelirovanie. – Kiev, 2014. – Т. 36. – №2. – S. 81 – 89.
8. Dolgin V.P. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnicheskimi i tekhnologicheskimi sistemami i ob'ektami. Chislennyye metody analiza i sinteza sistem i ob'ektov / V.P. Dolgin. – Sevasto-pol': Izd-vo SevNTU, 2003. – 320s.
9. Novoselov Iu.K. Obespechenie stabil'nosti tochnosti detalei pri shlifovanii / Iu.K. Novoselov, E.Iu. Tatarkin; Pod red. A.V. Koroleva. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1988. – 128 s.
10. Tverskoi M.M. Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami obrabotki detalei na stankakh / M.M. Tverskoi. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 208 s.
11. Bratan S.M. Stokhasticheskaia diagnosti-ka vzaimodeistviia instrumenta i zagotovki pri tochenii / S.M. Bratan Iu. O. Streliaia, P. A. Novikov // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k, vip. №30, 2012. – S 41–51.
12. Bratan S.M. Obespecheniia stabil'nosti parametrov kachestva izdelii za schet razrabotki sis tem adaptivnogo upravleniia / S.M. Bratan Iu. O. Streliaia, M.G. Stupko //Vestnik SevNTU. Vyp. 139: MashinopriBORostroenie i transport: sb. nauch. tr. / Redkol.: S.M. Bratan (otv. Red.) i dr.; Sevastop. Nats. Tekhn. un-t. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2013. – S. 22-27.
13. Bratan S.M., Sidorov D., Gutsalenko Y. Synthesis of model the luenberger observer for external cylindrical grinding process Fiabilitate si Durabilitate – fiability & Durability Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu, Supplement no 1.
14. Пат. 103636 Украина, МПК G05B 19/18. Shlifoval'nyi stanok Zaiavitel' i patentoobladatel' SevNTU. – № а201106170; zaiav. 17.05.2011; opubl. 11.11.2013, Biul. № 21. / Dol-gin V.P., Bratan S.M., Krylov I.V., Kainov D.A.
15. Пат. 83619 Украина, МПК 2006 G05B 11/01. Sistema korrektsii nestatsionarnogo dinamicheskogo ob'ekta Zaiavitel' i patentoobladatel' SevNTU. – № 20040605149; zaiav. 29.06.2004; opubl. 11.08.2008, Biul. № 15. / Dolgin V.P.

Рецензент д.т.н., проф. Братан С.М.

УДК 519.876.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «УСТРОЙСТВО ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ – УСТРОЙСТВО ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ»

В.Я. Копп¹, М.В. Заморёнов¹, А.А. Селькин¹, О.В. Филипович¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Получена 05.02.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы построения имитационной модели процесса функционирования системы "приемное устройство – устройство обработки информации". Проводится обоснования выбора системы имитационного моделирования AnyLogic, как имеющей значительные преимущества для решаемой задачи по сравнению с GPSS. Приводится аналитическое решение данной задачи, известное из литературы. Моделирование производится с учетом времен наработки на отказ и восстановление устройства обработки информации, а также времени окончания временного резерва, за который отвечает приемное устройство. При моделировании принято следующее ограничение: отказы приемного устройства столь редки и краткосрочны, что ими можно пренебречь. Проведен ряд экспериментов с имитационной и аналитической моделями. Проведено сравнение результатов экспериментов по имитационной модели и по аналитической полумарковской модели, построенной на основании метода определения функций распределения времен пребывания системы в состояниях траекторий. Проведенное в статье сравнение результатов моделирования подтвердило правильность построения полумарковской модели.

Ключевые слова: имитационная модель, полумарковская система, метод траекторий.

INFORMATION RECEIVING «DEVICE INFORMATION PROCESSING – DEVICE SYSTEM OPERATION PROCESS SIMULATION»

V. Kopp¹, M. Zamoryenov¹, A. Selkin¹, O. Filipovich¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Received 05.02.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

This article deals with the design of "Information receiving device – Information processing device" system operation process simulation. AnyLogic is chosen as a simulation system due to the fact that it has significant advantages in comparison with GPSS in terms of the considered problem. An analytical solution of the given problem known from the literature is proposed. The simulation is performed with respect to time between failures, information processing device recovery time, and termination of a temporary reserve time for which the receiving device is responsible. It is assumed that failures of the receiving device are so rare and short that they can be neglected. A number of experiments with simulation and analytical models is carried out. A comparison of results obtained from the simulation model and the analytical semi-Markov model, which is based on system residence time in trajectories states distribution function determination method, is performed. The comparison of results proves the correctness of semi-Markov model.

Keywords: simulation model, semi-Markov system, trajectories method.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного динамического развития общества и усложнения технической и социальной инфраструктуры информация становится таким же стратегическим ресурсом, как традиционные материальные и энергетические ресурсы. Современные информационные технологии, позволяющие создавать, хранить, перерабатывать и обеспечивать эффективные способы представления информационных ресурсов потребителю, стали важным фактором жизни общества и средством повышения эффективности управления всеми сферами общественной деятельности. Однако, с ростом объема обрабатываемой информации появилась необходимость ее распределенной обработки [1-3], например, в простейшем случае, процессов хранения и обработки.

В настоящее время интенсивно развиваются системы распределенной обработки информации (РОИ), которые широко применяются во многих областях деятельности: в промышленности, в автоматизированных системах научных исследований, при управлении сложными транспортными средствами, в бортовых управляющих комплексах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной статье проводится анализ функционирования информационной структуры (рис. 1), содержащей устройство обработки информации (УОИ) и устройство приема информации (УПИ), позволяющее данной структуре функционировать некоторое случайное время после отказа УОИ. При анализе принимается следующее допущение: отказы УПИ настолько редки и краткосрочно, что ими можно пренебречь.



Рисунок 1 – Система «приемное устройство – устройство обработки информации»

Система имеет следующие состояния:

- S_0 – УОИ исправно, информация принимается и обрабатывается, состояние работоспособное;
- S_1 – УОИ неисправно, резерв времени не израсходован, информация принимается, состояние работоспособное;
- S_{2x} – УОИ неисправно, резерв времени израсходован, информация не принимается и не обрабатывается, до восстановления УОИ осталось время x , состояние не работоспособное (отказовое).

Граф состояний системы представлен на (рис. 2).

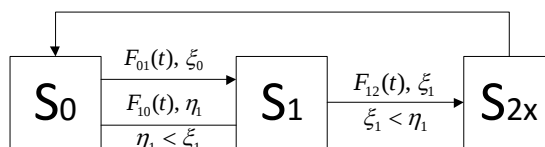


Рисунок 2 – Граф состояний для исходной системы

Из литературы [4] известна полумарковская [5-11] модель подобной системы, построенная на основании предложенного в [4, 12] метода траекторий, базирующегося на теореме функций распределения времен пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий.

Целью данной статьи является проверка правильности построенной полумарковской модели такой системы путем сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования [13-17]. Для чего была построена имитационная модель системы «приемное устройство – устройство обработки информации». Модель определяет стационарные характеристики (математическое ожидание и дисперсию) случайной величины времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний $M_+ = \{S_0, S_1\}$. Эта случайная величина является временем наработки на отказ системы в целом по известным функциям распределения $F_{01}(t)$, $F_{10}(t)$ и $F_{12}(t)$ времен наработки на отказ ξ_0 и восстановления η_1 УОИ, а также заданного временного резерва ξ_1 , обеспечиваемого УПИ, являющихся случайными величинами. Функции распределения $F_{01}(t)$, $F_{10}(t)$, $F_{12}(t)$ имеют плотности распределения $f_{01}(t)$, $f_{10}(t)$, $f_{12}(t)$. Отказ системы наступает в момент времени, когда время восстановления η_1 объекта после очередного нарушения его работоспособности превысит его резерв времени ξ_1 ($\eta_1 > \xi_1$), и продолжается до окончания восстановления объекта.

Аналитическое решение задачи в области изображений по Лапласу, полученное методом траекторий [4] имеет вид:

$$F_{\Sigma}^{\theta}(s) = \frac{P_{12}F_0(s)}{1 - (1 - P_{12})f_0(s)} \cdot \frac{P_{12}F_1(s)}{1 - (1 - P_{12})f_{21}(s)},$$

где s – комплексная переменная оператора Лапласа, P_{12} – вероятность перехода системы из состояния S_1 в состояние S_2 ,

$$F_0(t) = F_{01}(t); F_1(t) = 1 - \bar{F}_{01}(t)\bar{F}_{12}(t).$$

При выборе среды моделирования учитывалось следующее. GPSS – язык моделирования, используемый для имитационного моделирования различных систем, в основном систем массового обслуживания. Язык GPSS, несмотря на некоторые достоинства, имеет и целый ряд недостатков: простейший интерфейс пользователя, недостаточно функциональный редактор моделей, слабо автоматизированная технология проведения исследований, устаревший способ представления и анализа результатов и т.д. В программе на языке GPSS достаточно сложно представить непосредственно процессы обработки данных на уровне алгоритмов. Кроме того, модель представляет собой программу, а значит, не имеет графической интерпретации, что затрудняет процесс разработки модели и снижает наглядность модели в целом. Эти недостатки все более явно проявляются в настоящее время на фоне современных средств информационных технологий. На данный момент созданы гораздо более современные, с точки зрения информационных технологий и пользовательского интерфейса, программные продукты имитационного моделирования, например, AnyLogic – инструмент имитационного моделирования, позволяющий эффективно использовать и сочетать все существующие подходы к моделированию. AnyLogic имеет существенное преимущество перед GPSS именно в тех проектах, разработка которых требует выхода за границы одной единственной парадигмы моделирования. AnyLogic поддерживает моделирование систем как с дискретными, так с непрерывными событиями, а также их комбинации. Построение модели в AnyLogic не требует написания программного кода, что упрощает построение моделей в среде по сравнению с GPSS World. Поэтому в качестве среды моделирования была выбрана среда AnyLogic 7.2.1.

С применением концепции многоподходного моделирования модель исследуемой системы в AnyLogic имеет вид, представленный на рис. 3.

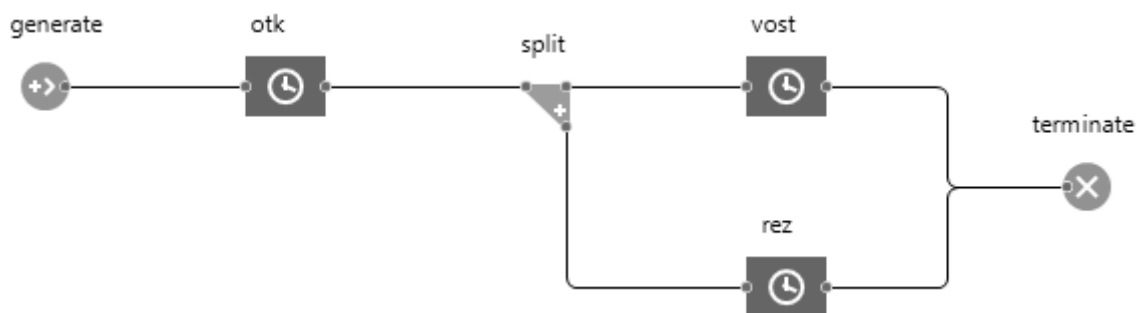


Рисунок 3 – Модель системы в AnyLogic

В данной модели:

- *generate* – источник отказов (заявок);
- *otk* – обслуживающее устройство, имитирующие наработку на отказ;
- *vost* – обслуживающее устройство, имитирующие процесс восстановления;
- *rez* – обслуживающее устройство, имитирующие процесс резервного функционирования системы;
- *split* – блок, создающий копию заявки;
- *terminate* – блок, выводящий заявку из системы.

Блок «generate» служит для введения заявок (отказов) в модель. В момент запуска системы (событие startEvent) блок создает 1 заявку при помощи вызова функции inject(1). Свойства блока представлены на (рис. 4).

источник - Source

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Прибывают согласно:

Новый агент:

Местоположение прибытия:

Рисунок 4 – Свойства блока «источник»

Блок «otk» служит для моделирования наработки на отказ ТЯ.
Свойства блока представлены на (рис. 5).

otk - Delay

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Тип: ☒ Определенное время
☐ Пока не вызван метод stopDelay()

Время задержки:

Вместимость:

Рисунок 5 – Свойства блока «otk»

Блок «split» создает копию заявки.
Свойства блока представлены на (рис. 6).

split - Split

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Количество копий:

Новый агент (копия):

[создать другой тип](#)

Рисунок 6 – Свойства блока «split»

Блок «vost» моделирует процесс восстановления ТЯ.
Свойства блока представлены на (рис. 7).

Рис. 7 – Свойства блока «vost»

При выходе заявки из блока «vost» выполняется следующая последовательность действий:

1. Проверяется, есть ли заявка в блоке «rez»;
2. Если заявка есть, то:
 - 2.1) выполняется остановка работы блока;
 - 2.2) удаляется заявка, находящаяся в блоке;
 - 2.3) возобновляется работа блока;
 - 2.4) создается новая заявка в блоке «generate»;
3. Иначе, обработанная заявка выходит из блока.

Ниже представлен фрагмент кода, соответствующий вышеописанной последовательности действий:

```
if (rez.size() == 1) {
  rez.suspend();
  rez.remove(rez.get(0));
  rez.resume();
  generate.inject(1);}
```

Блок «rez» моделируют процесс резервирования. Свойства блока представлены на рис. 8.

Рисунок 8 – Свойства блока «rez»

При выходе заявки из блока «rez» выполняется следующая последовательность действий:

1. Вычисляется время пребывания системы в работоспособном состоянии: $t = \text{time}() - t$;
2. Выполняется сбор статистики: $x\text{time.add}(t)$;
3. Т.к. система далее переходит в работоспособное состояние, то выполняется сохранение текущего времени моделирование во вспомогательную переменную t : $t = \text{time}()$;
4. Генерируем новую заявку в блоке «generate»: $\text{generate.inject}(1)$;

Было рассмотрено три варианта исходных данных.

Исходными данными для моделирования служат:

ФР $F_{01}(t)$, $F_{10}(t)$ и $F_{12}(t)$ распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \gamma_1, \gamma_2$ соответственно. Причем

$$f_{01}(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$f_{10}(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

$$f_{12}(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

В табл. 1 – 3 занесены математические ожидания и среднеквадратичные отклонения времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний $M_+ = \{S_0, S_1\}$, полученные в результате моделирования для каждого набора входных данных. Также построены гистограммы распределения.

Таблица 1. Результаты эксперимента №1

Параметры	Мат. ожидание		Среднекв. отклонение	
	аналит.	имит.	аналит.	имит.
$\lambda_1 = 0,07$	20,219	20,303	18,589	18,775
$\lambda_2 = 0,68$				
$\mu_1 = 1,1$				
$\mu_2 = 10,9$				
$\gamma_1 = 4,4$				
$\gamma_2 = 13,3$				

Таблица 2. Результаты эксперимента №2

Параметры	Мат. ожидание		Среднекв. отклонение	
	аналит.	имит.	аналит.	имит.
$\lambda_1 = 0,14$	11,229	11,107	10,237	10,113
$\lambda_2 = 1,36$				
$\mu_1 = 1,1$				
$\mu_2 = 10,9$				
$\gamma_1 = 3,3$				
$\gamma_2 = 10$				

Таблица 3. Результаты эксперимента №3

Параметры	Мат. ожидание		Среднекв. отклонение	
	аналит.	имит.	аналит.	имит.
$\lambda_1 = 0,28$	5,546	5,493	5,049	4,925
$\lambda_2 = 2,72$				
$\mu_1 = 2,2$				
$\mu_2 = 21,8$				
$\gamma_1 = 6,6$				
$\gamma_2 = 20$				

Выводы

Проведенные исследования подтвердили правильность использованного авторами [5] метода моделирования ПМ систем, а также модели, построенной на его основе. Относительная погрешность по трем экспериментам по математическому ожиданию не превысила 1%, по среднеквадратическому отклонению – 2,5%. В дальнейших исследованиях предполагается построить модели информационных и производственных систем различных структур.

Исследования выполнены при финансовой поддержке министерства образования и науки российской федерации по базовой части государственного задания №2014/702 проект № 3858 и при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-01-05840.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шокин Ю.И. Распределенные информационные системы. Вычислительные технологии. – Том 3, №5, 1998. – с. 79;
2. Илюшечкина Л.В. Разработка средств моделирования для исследования систем распределенной обработки информации // Дис. раб. – М: Москва, 2002. – 240 с.
3. Селькин А.А., Исследование характеристик процесса распределенной обработки информации при использовании имитационного моделирования. / А.А. Селькин, М.В. Заморёнов // Материалы международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и мехатроника – 2015». – Севастополь 13 – 15 мая, 2015 г. – с. 235-239;
4. Копп В.Я., Заморенов М.В., Обжерин Ю.Е., Филипович О.В. Методы моделирования полумарковских систем. Адаптивні системи автоматичного управління: Міжвідомчий науково-технічний збірник. Дніпропетровськ, 2015. Вип. №1(26). С. 208-221.
5. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.
6. Королюк В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с.
7. Филипович О.В., Копп В.Я., Галкина Л.В. Моделирование участков автоматизированных линий с учетом стохастического характера межоперационных заделов //Сб. научн. тр. СИЯЭиП. Севастополь: СИЯЭиП, 2001. Вып. 5. С. 213217.
8. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier, Academic Press, 2015. 214 p.
9. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.
10. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Моделирование автоматизированных линий. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 240с.
11. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. 284 с.
12. Заморёнов М.В., Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Заморёнова Д.В. Апробация метода траекторий на примере моделирования процесса функционирования производственного элемента с обесценивающими отказами. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2015, С. 57-71.
13. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS [Текст] / Т.Дж. Шрайбер; [пер. с англ. В.И. Гарчера, И.Л. Шмуйловича]; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
14. Советов Б.Я. Моделирование систем [Текст] / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
15. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS [Текст] / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. — 416 с.
16. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / Ю.Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
17. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука [Текст] / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 297с.

REFERENCES

1. Shokin Yu. I. Distributed information systems. Computing technologies. – Vol. 3, №5, 1998 – p.79;
2. Ilyushechkina L.V. Development of simulation tools for researching of distributed information processing systems. // Thesis. – PH: Moscow, 2002. – 240 p.
3. Selkin A. A. Research of characteristics of distributed information processing process using simulation. / A. A. Selkin, M. V. Zamoryenov // Proceedings of international scientific and technical conference “Intellectual control systems and mechatronics – 2015”. – Sevastopol March 13th – 15th, 2015 y. – p. 235-239;
4. Kopp V. Ya., Zamoryenov M.V., Obzherin Yu. E., Filipovich O. V. Methods of semi-Markov systems modeling. Adaptive systems of automatic control. Interdepartmental scientific and technical collection. Dnepropetrovsk. 2015, №1(26). P. 208-221;
5. V.S. Korolyuk, A.F. Turbin, Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem [The Markov renewal processes in the system reliability problems], Kiev, Naukova Dumka, 1982.
6. V.S. Korolyuk, Stokhasticheskiye modeli system [Stochastic models of systems], Ed. A.F. Turbin, Kiev, Naukova Dumka, 1989.
7. O.V. Filipovich, V.Ya. Kopp, L.V. Galkina, Modelirovaniye uchastkov avtomatizirovannykh liniy s uchetom stokhasticheskogo kharaktera mezhoperatsionnykh zadelov [Modeling of the automated line sections with consideration for stochastic character of interoperational process stock], Sb. Nauch. Tr. SIYaEiP, Sevastopol: SIYaEiP, No. 5 (2001) 213217.
8. Yu.E. Obzherin, E.G. Boyko, Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures, Elsevier, Academic press, USA, 2015.

9. A.I. Peschansky, Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input, Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013.
10. V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, A.I. Peschanskiy, Modelirovaniye avtomatizirovannykh liniy [Modeling of the automated lines], Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2006.
11. V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin A.I. Peschanskiy, Stokhasticheskiye modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniyem [Stochastic models of automated manufacturing systems with time reservation], Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2000.
12. Zamoryenov M.V., Kopp V. Ya., Obzherin Yu. E., Zamoryenova D. V. Approbation of trajectories method based on modeling of production element functioning process with depreciating refusals. TulSU News. Technical science. №8: in 2 parts. Part. 1 Tula: PH TulSU, 2015, P. 57-71.
13. Shrajber T. G. Modeling in GPSS [Text] / Shrajber T. G.; under edition of. M. A. Fajnberg. – PH.: Mechanical Engineering, 1980. – 592 p.
14. Sovetov B.Ya. Modeling of systems [Text] / B.Ya. Sovetov, C.A. Yakovlev. – PH.: High School., 2001. – 343 p.
15. Tomashevskij V.N. Simulation in GPSS [Text] / V.N. Tomashevskij, E.G. Zhdanova. – PH.: Bestseller, 2003. — 416 p.
16. Karpov, Yu. G. Simulation of systems. Introduction into simulation with AnyLogic 5 [Text] / Yu. G. Karpov. – PH.: BHV-Petersburg, 2005. – 400 p.
17. Shannon P. Simulation of systems: art and science [Text] / P. Shannon. – PH.: World, 1978. – 297p.

Рецензент д.т.н. профессор Братан С.М.

УДК 621.9

РАЗВИТИЕ СТРАТЕГИИ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.Н. Михайлов¹, М.Г. Петров¹, А.Т. Цыркин¹¹Донецкий национальный технический университет, Донецк

Получена 05.02.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

Предложена схема структурирования синтеза функционально-ориентированных технологий, содержащая алгоритмы направленного поиска и генерирования вариантов технологических решений и параметров технологических воздействий в процессе синтеза технологического процесса, реализуемого по эвристическим правилам. На каждом этапе синтеза функционально-ориентированной технологии изготовления изделия осуществляется анализ и выбор необходимых технологических воздействий обработки предметов труда. Совокупность последовательных согласований, выбранных на каждом этапе технологических воздействий обработки предметов труда в виде технологических операций представляет собою разрабатываемый технологический процесс, формируемый посредством конструкторско-технологической реализации отдельных технологических подсистем, каждая из которых связана с соответствующим этапом изготовления изделия и другими технологическими подсистемами. В соответствующей технологической подсистеме на основе заданных технологических воздействий обработки предметов труда реализуется проектирование технологической операции, содержащей технологические и вспомогательные переходы и другие ее надлежащие части.

Ключевые слова: функционально-ориентированный метод, итеративный подход, иерархический уровень, синтез технологий, эксплуатационная функция.

DEVELOPMENT OF THE SYNTHESIS STRATEGY OF FUNCTIONALLY ORIENTED MECHANICAL ENGINEERING TECHNOLOGIES

A.N. Mikhaylov¹, M.G. Petrov¹, A.T. Tsyркин¹¹Donetsk National Technical University, Donetsk

Received 05.02.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The scheme of structuring of functionally oriented technology synthesis that includes algorithms of guided search and generation of technological solution alternates and technological impact parameters in the technological process synthesis implemented according to heuristic rules is proposed. The analysis and the choice of the necessary technological impacts of the labour object machining are done at every stage of the synthesis of the functionally oriented technology of the product making. The whole set of consequent matching of the technological impacts of the labour object machining selected at every stage in the form of technological operations is a developed technological process formed by design and technological implementation of separate technological sub-systems with each of them being related to the corresponding stage of the product making and other technological sub-systems. The design of the technological operation that includes technological and auxiliary transitions and its other appropriate parts is implemented according to the given technological impacts of the labour object machining in the corresponding technological sub-system.

Keywords: functionally oriented method, iterative approach, hierarchic level, technology synthesis, operation function.

ВВЕДЕНИЕ

Объективные условия развития рыночной экономики определяют необходимость целевой ориентации научных исследований, процессов проектирования и производства изделий машиностроения на формирование более высокого уровня качества продукции. Традиционное проектирование технологий машиностроения направлено на обеспечение реализуемости проекта, его конструктивной целостности, оптимальности, экономической рентабельности. Для современного проектирования, кроме того, актуальны минимизация экологического ущерба; эргономический учет психологических возможностей человека и создание удобств и безопасности для его работы с техническими средствами; эстетические характеристики изделия. Повышение требований к совершенствованию свойств изделий актуализирует поиск новых методов

проектирования технологических процессов. Развитие науки и техники постоянно ставит перед разработчиками задачу применять при проектировании технологических процессов изготовления изделий более совершенные научно обоснованные подходы, обеспечивающие реализацию качественно новой совокупности свойств и меры полезности изделий машиностроения.

Разработка технологического процесса и его отдельных этапов, особенно принципиально новых, основанных на новейших достижениях науки, требует от разработчиков высокого уровня подготовки, креативность, способность находить нетривиальное решение проблемы, умение не только получать информацию, но анализировать и перерабатывать ее в соответствии с условиями решаемой задачи.

Разработан целый ряд методов, формулирующих общие методические средства, обеспечивающие существенный подъем эффективности труда инженерно-технических работников и создателей новой техники [1-4]. В своем большинстве эти средства представляют программы, организующие решение задачи выполнением определенных последовательных действий.

Очевидно, что эффективность применения логистических методов при решении нестандартных научно-технических задач будет тем существенней, чем разнообразнее и действеннее эти методы, чем полнее они соответствуют поставленной задаче и цели, которую необходимо достичь. Большое значение приобретают методы, предназначенные для решения конкретных практических задач, например, для проектирования технологий машиностроения, обеспечивающие корректную организацию обработки информации, преодоление психологической инерции разработчика, организацию как выявления и разрешения противоречий, так нахождения оптимальных или рациональных решений. Одним из результативных методов, практикуемых при разработке качественных технологических процессов изготовления изделий машиностроения, является функционально-ориентированный метод (ФОМ). Метод включает: деление изделия на функциональные элементы, а технологического процесса получения изделия на этапы и структурные уровни по видам и глубине технологических воздействий; применение итеративного и итерационного анализов; восьми особых принципов проектирования новых технологий, а также служит основой синтеза функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5].

Характерной особенностью синтеза ФОТ является реализация комплексного подхода к анализу научно-технологической информации, использованию, усовершенствованию и созданию прогрессивных технологий, направленных на повышение качества изделий. Синтез ФОТ обеспечивает изготовление изделий машиностроения с качественно новой совокупностью свойств и мерой их полезности, а также со специальными нетрадиционными свойствами, и основывается на общей методологии разработки технологических процессов [5]. Функцией цели при принятии решений об оптимальной структуре и параметрах технологического процесса являются интегральные квалитетические критерии технического уровня изделий, системно характеризующие комплекс их эксплуатационных, физико-механических и других соответствующих свойств. Обеспечение функционально-эксплуатационных свойств изделия строится на базе тщательного анализа эксплуатационных функций, воздействующих на функциональные элементы данного изделия. При этом выбор известных или разработка качественно новых технологических решений реализуется при соблюдении целевого ряда ограничений, условий и критериев.

Синтез ФОТ базируется на реализации множества различных по качеству и свойствам технологических воздействий, общая структура и параметры каждого из которых согласуются с функциональными особенностями эксплуатации отдельных элементов модуля изделия. Структура реализации синтеза ФОТ предусматривает деление изделия на иерархические уровни его функциональных элементов и глубину технологических воздействий. Такое деление логически обосновано, так как содействует топологическому установлению местонахождения функциональных элементов в изделии, функционально-структурных взаимосвязей между ними, ориентацию необходимого множества алгоритмов технологических воздействий

на необходимые участки и зоны изделия, а также выбору прецизионных и эффективных технологических воздействий на них. То есть, заданные, требуемые и предельные свойства всего изделия обеспечиваются за счет ориентации устанавливаемых технологических воздействий, потоков материи, энергии и информации на функциональные элементы, содержащие местные уровни – уровень всего изделия, уровень участков, уровень составляющих, уровень зон, уровень макрозон, уровень микрозон, уровень нанозон [5]. При синтезе ФОТ необходимые параметры изготовления изделия определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [5]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе детали, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств этом функциональном элементе детали на каждом уровне глубины технологии.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на деталь и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств на каждом уровне глубины технологии.

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах детали на каждом уровне глубины технологии.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента детали на каждом уровне глубины технологии.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали на каждом уровне глубины технологии.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали на каждом уровне глубины технологии.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом на каждом уровне глубины технологии.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом на каждом уровне глубины технологии.

В работе [5] рекомендуется использовать ФОМ при разработке комплексного технологического процесса изготовления изделия от операции получения заготовки до операций его консервации и упаковки. Возможности применения синтеза ФОТ при проектировании технологических процессов получения изделий показаны в монографии [5] и ряде статей [6-13].

Немаловажным условием при разработке технологического процесса является прагматичное построение схемы его проектирования, максимально содействующей разработчику в решении поставленных задач изготовления изделия [14].

Целью данной статьи является развитие стратегии синтеза ФОТ машиностроения, направленное на повышение эффективности ее использования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При синтезе ФОТ изготовления изделия определяются этапы [5], представляющие собой технологические задачи, устанавливающие последовательность исполнения технологического процесса при обеспечении формообразования, обработки, сборки или перемещения предметов труда. Например: изготовление заготовки, ее механическая обработка, поверхностное упрочнение, термическая обработка, чистовая обработка и консервация изделия.

Предлагаемая схема синтеза ФОТ, включающая концептуальную модель синтеза ФОТ и ее структурное решение, показана на рис. 1. Рассмотрение и построение концептуальной модели синтеза ФОТ обеспечивает разделение общей задачи изготовления изделия на отдельные технологические задачи, что позволяет определить этапы исполнения технологического процесса.

На каждом этапе синтеза ФОТ изготовления изделия осуществляется анализ и выбор необходимых технологических воздействий обработки предметов труда. Совокупность последовательных согласований выбранных на каждом этапе технологических воздействий обработки предметов труда в виде технологических операций представляет собою разрабатываемый технологический процесс, формируемый посредством конструкторско-технологической реализации отдельных технологических подсистем ($ТП_1, ТП_2, ТП_3, \dots, ТП_N$), каждая из которых связана с соответствующим этапом изготовления изделия и другими технологическими подсистемами. В соответствующей технологической подсистеме на основе заданных технологических воздействий обработки предметов труда реализуется проектирование технологической операции, содержащей технологические и вспомогательные переходы и другие ее надлежащие части.

Построение в составе концептуальной модели синтеза ФОТ этапов ее разработки, установление необходимых технологических воздействий обработки предметов труда в составе каждого этапа и конструкторско-технологической реализации отдельных технологических подсистем осуществляются на основе ФОМ. Алгоритм направленного поиска и генерирования альтернативных технологических воздействий и вариантов технологических решений в процессе синтеза ФОТ реализуется по эвристическим правилам. Полученные свойства (качественно новая совокупность свойств) оцениваются, например, на базе предельного критерия качества и эффективности и достигаются при использовании итеративных связей между всеми этапами структуры синтеза ФОТ. Итеративный подход дает возможность выполнять синтез ФОТ посредством реализации, как последовательных процессов, так и многократных повторяющихся возвратных процессов, выполняемых за счет обратных связей. В процессе разработки синтеза ФОТ количество и последовательность этапов разработки и, соответственно, взаимосвязанных с ними технологических подсистем может изменяться за счет уточнения применяемых технологических воздействий. Это связано с выявлением и уточнением материальных, энергетических и информационных связей между функциональными элементами изделия, влияющих на формирование конечных свойств изделия.

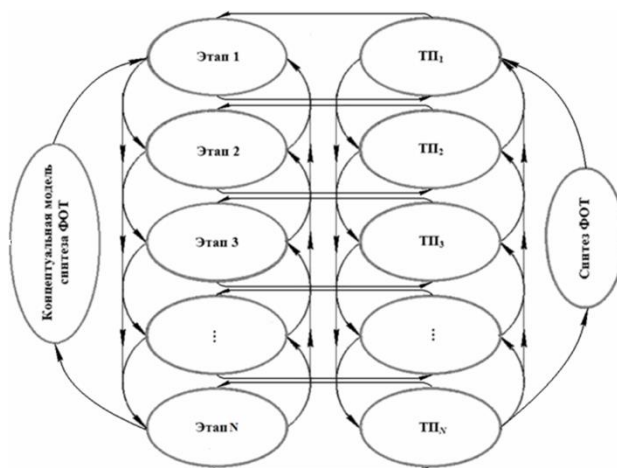


Рисунок 1 – Схема синтеза ФОТ изготовления изделия

Свойства функциональных элементов изделия, полученные в процессе исполнения технологических подсистем, взаимосвязаны и взаимозависимы, поэтому повышение или понижение таких свойств в рамках каждой технологической подсистемы синтеза технологического процесса влечет необходимость изменения качественных и количественных характеристик технологических воздействий на функциональные элементы в других технологических подсистемах разрабатываемого технологического процесса. Изменение режимов и/или методов технологических воздействий на функциональные элементы изделия любого иерархического уровня, определяющих свойства этих элементов, также предопределяют необходимость корректировки режимов и/или методов технологических воздействий на функциональные элементы изделия других иерархических уровней для обеспечения согласования соответствующих свойств:

$$(TB_1 \Rightarrow C_1) \Leftrightarrow (TB_i \Rightarrow C_i),$$

где TB_1 – технологическое воздействие на функциональные элементы на 1-ом иерархическом уровне деления изделия;

C_1 – свойства функциональных элементов 1-го иерархического уровня деления изделия;

TB_i – технологическое воздействие на функциональные элементы на i -ом иерархическом уровне деления изделия; C_i – свойства функциональных элементов i -го иерархического уровня деления изделия.

Технологические воздействия на функциональные элементы каждого иерархического уровня деления изделия участвуют в формировании свойств этих элементов и реализуются при соблюдении установленных ограничений, условий и критериев:

$$(TB_i \Rightarrow C_i) \wedge (O_i, U_i, K_i),$$

где O_i – ограничения, установленные для i -ого иерархического уровня деления изделия; U_i – условия, установленные для i -ого иерархического уровня деления изделия; K_i – критерии, установленные для i -ого иерархического уровня деления изделия.

При проектировании технологического процесса показатели ограничений, условий и критериев каждого иерархического уровня функциональных элементов изделия являются собственным подмножеством аналогичных показателей для всего изделия, устанавливаемых заданием на его изготовление:

$$(O_i, U_i, K_i) \subseteq (O_u, U_u, K_u),$$

где O_u – ограничения, установленные заданием на изготовление изделия; U_u – условия, установленные заданием на изготовление изделия; K_u – критерии, установленные заданием на изготовление изделия.

Свойства изделия являются собственным надмножеством суммы согласованных свойств функциональных элементов изделия и обеспечивают эксплуатационные функции изделия:

$$C_u \supseteq \sum C_{1+i} \Rightarrow F_u,$$

где C_u – свойства изделия; F_u – эксплуатационные функции изделия.

Выводы

Предложенная схема синтеза ФОТ основана на разделении в рамках концептуальной модели синтеза ФОТ поставленной задачи изготовления изделия на отдельные и последовательные технологические задачи. В рамках структурированных этапов изготовления изделия для каждой соответствующей технологической подсистеме реализуется анализ и выбор технологических воздействий, направленных на обработку предметов труда. Выбранные на каждом этапе технологические воздействия обработки предметов труда реализуются в технологических подсистемах в технологические операции, формирующие технологический процесс изготовления изделия.

Показано, что свойства функциональных элементов изделия, полученные в процессе исполнения технологических подсистем, взаимосвязаны и взаимозависимы. Повышение или понижение таких свойств в рамках каждой технологической подсистемы синтеза технологиче-

ского процесса приводит к необходимости изменения качественных и количественных характеристик технологических воздействий на функциональные элементы в других технологических подсистемах разрабатываемого технологического процесса.

Использование уточненной схемы синтеза ФОТ позволяет разработчику в процессе разработки технологического процесса изготовления изделия выбрать необходимые технологические воздействия и рационально адаптировать свойства изделия и его элементов к эксплуатационным функциям, воздействующим на изделие.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ РАЗРАБОТОК В ДАННОМ НАПРАВЛЕНИИ

Имеющее место практическое применение синтеза ФОТ машиностроения показало целесообразность проведения работы по дальнейшему развитию данной стратегии при проектировании комплексных технологических процессов.

Разрабатывается структурная схема проектирования и схема общей методики синтеза ФОТ при изготовлении деталей общего машиностроения с разбивкой на модули. Такая разбивка позволит разделить процесс разработки между разработчиками различной степени подготовки. Это освободит руководителя проекта от рутинной подготовительной и экспериментальной работы, что обеспечит возможность более его полного погружения в сущность проблемы, обобщения и анализа материала, продуцирования и генерирования идей. Известно [5], что заданные, требуемые и предельные свойства изделий обеспечиваются за счет ориентации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на базе восьми особых принципов на каждом уровне технологических воздействий. Учитывая развитие и потенциал использования синтеза ФОТ при изготовлении деталей общего машиностроения рационально осуществить уточнение этих принципов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустов М.А. Методические основы инженерно-технического творчества. – Томск: Томск. политех. ун-т, 2010. – 78 с.
2. Марков Ю.Г. Функциональный подход в современном научном познании. – Новосибирск: Наука, 1982. – 255 с.
3. Троицкий Д.А. Современные методы поиска новых технических решений // Вопросы изобретательства. – 1988 – № 4. – С. 48–52.
4. Половинкин А.И. Методы технического творчества / Учебное пособие – Волгоград. политехн. ин-т. – Волгоград, 1984. – 365 с.
5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
6. Михайлов А.Н. Общие особенности функционально-ориентированных технологий и принципы ориентации их технологических воздействий и свойств изделий // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – Т. 3. – С. 38–52.
7. Михайлов А.Н. Обобщенный принцип проектирования композиционных технологий машиностроения // Серия «Механика, машиноведение, машиностроение». – Ереван: Вестник ГИУА, 2012. – Вып. 15. – № 1. – С. 7–16.
8. Михайлов А.Н. Особенности синтеза структуры функционально-ориентированных технологических процессов комбинированной отделочной обработки осевых лезвийных инструментов / А.Н Михайлов, А.Е. Михайлова, А.Д. Маджид // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 1(18). – С. 131–150.
9. Михайлов А.Н. Некоторые аспекты создания технологий будущего // Новые технологии и системы обработки в машиностроении: Тезисы докладов научно-технической конференции. – Донецк: ДонГТУ, 1994 – С. 87–90.
10. Михайлов А.Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных и интегрированных технологий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2005 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Т. 2. – С. 261 – 275.
11. Михайлов А.Н. Общий теоретический подход создания новых прогрессивных технологий // Прогрессивные технологии машиностроения и современность: Сб. тр. международной научно-технической конференции. – Донецк, ДонГТУ, 1997 – С. 168–171.

12. Михайлов А.Н. Основные принципы и особенности синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Т. 3. – С. 61 – 77.
13. Михайлов А.Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 379.
14. Михайлов А. Н. Дискурсивное развитие стратегии функционально-ориентированного метода разработки технологических процессов в машиностроении / А. Н. Михайлов, А. Т. Цыркин, А. М. Петров и др. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 2(52). – С. 126–135.

REFERENCES

1. Shustov M.A. (2010). Metodicheskie osnovy inzhenerno-technicheskogo tvorchestva. [Methodological Foundations of Engineering and Technical Creativity]. Tomsk: Tomsk Polytechnicheski Universitet. [in Russian].
2. Markov Y.G. (1982). Funktsionalny podkhod v sovremennom nauchnom poznanii. [Functional Approach in the Modern Scientific Cognition]. Novosibirsk: Nauka. [in Russian].
3. Trotski D.A. Sovremennye metody poiska technicheskikh resheniy. [Modern Methods of Searching of New Technological Solutions] // Voprosy Izobretatelstva. – 1988. – is. 4. – P.48-52. [in Russian].
4. Polovinkin A.I. (1984). Metody technicheskogo tvorchestva. [Methods of Technical Creativity]. Volgograd. Volgogradski Polytechnicheski Institut. [in Russian].
5. Mikhailov A.N. (2009). Osnovy synteza funktsionalno orientirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya. [Basics of Synthesis of Functionally Oriented Technologies of Mechanical Engineering]. Donetsk: DonNTU. [in Russian].
6. Mikhailov A.N. Obshchie osobennosti funktsionalno-orientirovannykh tekhnologiy I printsipy orientatsii ikh tekhnologicheskikh vozdesystviy I svoystv izdeliy [General Features of Functionally Oriented Technologies and Principles of Orientation of their Technological Impacts and Product Characteristics] // Mashinostroyeniye I Tekhnosfera XXI Veka. – 2007. – vol. 3. – P. 38-52. [in Russian].
7. Mikhailov A.N. Obobshchenniy printsip proektirovaniya kompozitsionnykh tekhnologiy mashinostroyeniya. [The Summarized Principle of Design of Composition Technologies of Mechanical Engineering] // Mekhanika, Mashinovedeniye, Mashinostroyeniye. Vestnik GIUA. – 2012. – is. 15(1). – P. 7-16. [in Russian].
8. Mikhailov A.N. Osobennosti sinteza struktury funktsionalno-orientirovannykh tekhnologicheskikh processov kombinirovannoy otdelochonoy obrabotki osevykh lezviynikh instrumentov.[Characteristics of Synthesis of the Structure of Functionally Oriented Technological Processes of the Combined Machining of Axial Edge Tools] // Vysokiy Tekhnologii v Mashinostroyenii. Trudy KPI. – 2009. – is. 1(18). – P. 131-150. [in Russian].
9. Mikhailov A.N. Nekotorye aspekty sozdaniya tekhnologiy budushchego. [Some Aspects of Creation of the Future New Technologies] // Novye Tekhnologii i Sistemy Obrabotki v Mashinostroyenii. – Donetsk: DonSTU. – 1994. – P. 87-90. [in Russian].
10. Mikhailov. A.N. Obshchiy podkhod v sozdnii funktsionalno-orientirovannykh I integrirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya. [The General Approach in Creation of the Functionally Oriented and Integrated Technologies of Mechanical Engineering] // Mashinostroyeniye I Tekhnosfera XXI Veka. Donetsk: DonNTU. – 2005. – vol. 2. –P. 261-275. [in Russian].
11. Mikhailov A.N. Obshchiy teoreticheskiy podkhod sozdaniya novykh progressivnykh tekhnologiy [The General Theoretical Approach of Creation of New Progressive Technologies] // Progressivnye Tekhnologii Mashinostroyeniya I Sovremennost. Donetsk: DonSTU. – 1997. – P. 168-171. [in Russian].
12. Mikhailov A.N. Osnovnye printsipy I osobennosti sinteza funktsionalno-orientirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya [The Main Principles and Characteristics of the Synthesis of Functionally Oriented Technologies of Mechanical Engineering] // Mashinostroyeniye I Tekhnosfera XXI Veka. Donetsk: DonNTU. 2006. vol. 3. – P. 61-77. [in Russian].
13. Mikhailov A.N. (2002). Osnovy sinteza potochno-prostranstvennykh tekhnologicheskikh system. [Basics of the Synthesis of Spatial and Flow Technological Systems]. Donetsk: DonNTU. [in Russian].
14. Mikhailov A.N. Diskursivnoye razvitiye strategii funktsionalno orientirovannogo metoda razrabotki tekhnologicheskikh processov v mashinostroyenii. [Discursive Development of the Strategy of the Functionally-Oriented Method of Development of Technological Processes in Mechanical Engineering]. Progressivniye Tekhnologii i systemy mashinostroyeniya: mezhdunarodniy sbornik nauchnykh trudov. – 2015. – is. 2(52). – P. 123-138. [in Russian].

Рецензент д.т.н., профессор Покинелица Н.И.

УДК 796.0 (075.8)

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ИСПЫТАНИЮ ИМПЛАНТАТОВ МЕЖПОЗВОНКОВЫХ ДИСКОВ ЧЕЛОВЕКА

Е.В.Пашков¹, М.И.Калинин¹, В.И.Пахалюк¹, А.М.Поляков¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Получена 15.02.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

В статье нашли отражение актуальные задачи инженерной биомеханики, решаемые в структурных подразделениях созданного в университете научно-производственного комплекса, с разработкой методов математического и физического моделирования искусственных суставов двигательного аппарата человека. Представлены оригинальные конструкции имплантатов (эндопротезов) межпозвонковых дисков с закрытым исполнением опорно-центрирующих механизмов на основе сферических подвижных соединений, помещенных в титановые мембранные гофрированные коробки, заполненные биоинертной антифрикционной жидкостью с наночастицами немодифицированного углерода – фуллерена C₆₀. Он способствует снижению трения и интенсивности износа трущихся поверхностей. Также используются упругие кинематические связи с внутренним трением в виде плоских и круглых торсионов. Приведена методика испытания имплантатов с использованием оригинального шестистепенного симулятора на основе электрических сервоприводов с микропроцессорным управлением.

Ключевые слова: биомеханика, межпозвонковый диск, имплантат, мембрана, торсион, фуллерен, хирулен, титан, симулятор

A SISTEMATIC APPROACH TO THE DESIGN, PRODUCTION AND TESTING OF HUMAN INTERVERTEBRAL DISK IMPLANTS

Y.V.Pashkov¹, M.I.Kalinin¹, V.I. Pakhaliuk¹, A.M. Poliakov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Received 15.02.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The article reflects the actual problems of biomechanical engineering, solved in structural divisions created by the University scientific-industrial complex, which are associated with the development of methods of mathematical and physical simulation of artificial joints of the locomotion human system. The original designs of the implants (prostheses) of intervertebral discs with the closed by base-centering mechanisms based on spherical movable joints placed in the titanium membrane corrugated boxes filled with an anti-friction bioinert liquid, comprising nanoparticles of the unmodified carbon – fullerene C₆₀, are presented. It helps to reduce the intensity of friction and wear of the rubbing surfaces. The elastic kinematic links are also used with internal friction in the form of flat and round torsions. The technique of testing the implants using with six degrees of freedom the original simulator based on electric actuators with microprocessor control is also presented.

Keywords: biomechanics, intervertebral disc, implant, membrane, torsion, fullerene, chirulen, titanium, simulator.

ВВЕДЕНИЕ

Ведущиеся более 20 лет в университете научные исследования в области инженерной биомеханики человека позволили создать комплекс научных и учебно-научно-производственных подразделений. Среди них, такие как научно-исследовательская лаборатория биомеханики, полигон для испытания различных имплантатов (эндопротезов) и экспериментальный учебно-производственный завод, и оснастить их современным научным техническим и технологическим оборудованием, а также оригинальными испытательными стендами (симуляторами) собственной конструкции.

Актуальными задачами современной инженерной биомеханики являются разработка, исследования в области механической прочности, изготовление и испытание искусственных суставов опорно-двигательного аппарата человека, обеспечивающих на протяжении длительного срока требуемую динамику движения и высокое качество жизни пациентов [1].

При разработке экспериментальных методов проведения таких исследований необходимо принимать во внимание исключительно сложную кинематику человеческого тела, недостаток реперных точек и высокую податливость, что затрудняет оценку даже внешних параметров объектов исследования, оценивать репрезентативность полученных результатов с учетом условий их функционирования в организме человека.

Исследование динамических характеристик, оценка деформаций, напряжений и перемещений отдельных элементов и узлов биомеханической системы, усложняют методику решения поставленной задачи [2].

Разработанные и совершенствующиеся известные методы математического моделирования с учетом результатов, полученных с помощью методов физического моделирования различных структур и систем организма человека, позволяют формализовать и количественно описать основные параметры изучаемых объектов и протекающих в них процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особое место в деятельности созданного научно-производственного комплекса занимают исследования, связанные с проектированием, изготовлением и испытанием искусственных имплантатов (эндопротезов) межпозвонковых дисков (МД), что во многом объясняется появлением новых и совершенствованием существующих хирургических методик переднего (абдоминального) доступа со стороны брюшной полости [3].

Перспективность данной методики объясняется появлением новых конструкций имплантатов дисков, которые не могли быть имплантированы при использовании методов заднего доступа, но максимально способствуют восстановлению опорности и функциональности позвоночника пациента.

Известные конструкции МД характеризуются открытым исполнением опорно-центрирующего механизма (ОЦМ). Он выполнен на основе сферического двояковыпуклого вкладыша (В) в виде диска, размещенного в сферических углублениях на внутренних поверхностях соосно и оппозитно расположенных двух опорных пластин (П). Пластины снабжены фиксаторами (Ф) на их наружных поверхностях, например, копьеобразной формы, внедряемых в тела позвонков и предотвращающих поперечные и продольные смещения МД (рис.1, а).

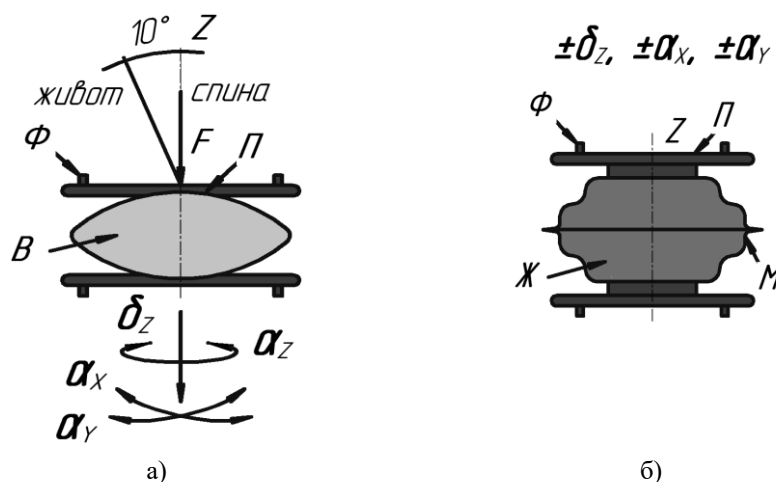


Рисунок 1 – Открытый сферический (а) и закрытый жидкостно-мембранный (б) МД

Такой состав основных конструктивных элементов свойственен имплантатам МД шейного, грудного, поясничного и пояснично-крестцового отделов позвоночника человека [3], имеющих четыре степени подвижности: упругое линейное δ_z вдоль оси Z и угловые перемещения относительно координатных осей X,Y,Z – α_x , α_y , α_z , соответственно. Толщина МД лежит в пределах 7...14 мм, а диаметр вкладыша – 22...25мм.

Как правило, опорные пластины выполняются из титановых сплавов, а сферические вкладыши – из аллопластических материалов, обладающих высокими демпфирующими свойствами, например, силиконового каучука [4,5] или биоинертных полимеров, физико-механические характеристики которых максимально приближены к аналогичным характеристикам тканей организма человека [6,7].

Установка таких МД, состоящих из трех отдельных элементов, сопровождается значительными трудностями, объясняющимися необходимостью обеспечения их центрирования относительно друг друга и прилегающих к опорным пластинам позвонков. К их существенным недостаткам следует также отнести сравнительно быстрый износ элементов ОЦМ, и в первую очередь, вкладыша вследствие недостатка смазки, а также попадание продуктов износа в окружающие ткани организма, удаление которых при проведении ревизионной операции требует больших временных затрат и увеличивает продолжительность пребывания пациента под наркозом.

Разработанные в лаборатории биомеханики университета имплантаты дисков отличаются от известных, применяемых в хирургической практике, оригинальностью конструктивных подходов, позволяющих повысить надежность, а, следовательно, и долговечность их эксплуатации до проведения ревизионной операции.

На (рис. 1, б) представлена схема конструкции закрытого жидкостно-мембранного МД (базовое исполнение), характеризующаяся отсутствием подвижных соединений с внешним трением в ОЦМ. Механизм выполнен в виде круглой упругой в осевом направлении плоской герметичной коробки, образованной двумя скрепленными по краям тарельчатыми гофрированными мембранами (М) из биоинертного тонколистового упругого титанового сплава, заполненной под избыточным давлением жидкостью (Ж), например, биоинертным медицинским гелем.

Соединение М между собой и с П осуществляется с помощью метода пластического деформирования (закатка, развальцовка), т.е. без использования сварки, которая приводит к перегреву материала и изменению физико-механических характеристик, снижая тем самым срок службы МД. Мембранная коробка с жидкостью обладает демпфирующими свойствами и обеспечивает эндопротезу три степени подвижности – линейное перемещение δ_z вдоль оси Z и угловые перемещения α_x и α_y относительно осей X и Y, соответственно. Моноблочное исполнение МД упрощает его установку в межпозвонковом пространстве. Для увеличения нагрузочной способности МД мембраны выполняются многослойными.

Открытое исполнение сферического ОЦМ не обеспечивает возможность применения искусственной антифрикционной смазки, способной уменьшить износ его элементов. Такая возможность появляется при закрытом исполнении ОЦМ (рис.2, а).

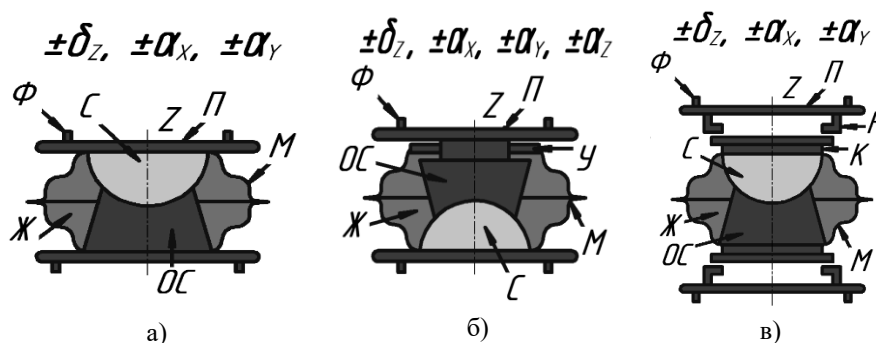


Рисунок 2 – Жидкостные мембранно-сферические МД

Он размещен внутри герметичной мембранной коробки, заполненной антифрикционной жидкостью (Ж) с наночастицами немодифицированного углерода – фуллерена C_{60} [8], снижающими в 8...10 раз коэффициент трения [9] между трущимися поверхностями сферы (С) и ее титановой опоры (ОС). При этом сфера выполнена из высокомолекулярного полиэтилена типа «Chirulen» (перекрестно связанный полиэтилен UHMWPE) [10].

Рассмотренная конструкция жидкостного мембранно-сферического МД характеризуется тремя степенями подвижности, увеличение числа которых до четырех, достигается с помощью ОС, установленной с возможностью вращения вокруг оси Z в подшипнике скольжения верхней мембраны, снабженном уплотнением (У), для устранения вытекания биоинертной гелеобразной смазки Ж из полости коробки.

Конструкция МД (рис. 2, в), предназначенная для проведения ревизионных операций для замены изношенных ОЦМ, состоит из трех автономных частей – двух опорных пластин (П) с направляющими (Н) и мембранной коробки с размещенным внутри ОЦМ и наружными каретками (К) на торцовых поверхностях. Высота опорных пластин (П) с фиксаторами (Ф) значительно меньше общей габаритной высоты МД в собранном виде, что упрощает их отдельную установку в тела позвонков и исключает необходимость выполнения в них специальных направляющих канавок для фиксаторов, увеличивающих период восстановления пациента. После их установки каретки мембранной коробки вводятся в пазы направляющих и удерживаются в них с помощью упругих защелок.

Проведение ревизионной операции ограничивается простой заменой мембранной коробки. Отсутствием в конструкциях эндопротезов ОЦМ и подшипниковых узлов для их элементов с внешним трением, характеризуются жидкостные мембранные пластинчато-торсионные МД, обладающие четырьмя степенями подвижности (рис. 3).

ОЦМ таких МД образован упругими тарельчатыми гофрированными мембранами (М) и плоскими торсионными (ПТ) в виде упругих пластин, работающих на кручение.

В конструкции МД на (рис.3, а), концы расположенных с одинаковым шагом по окружности прямоугольных пластин ПТ, прикреплены к верхней П и доньшку стакана, установленного внутри мембранной коробки и соединенного по краям с ее верхней М.

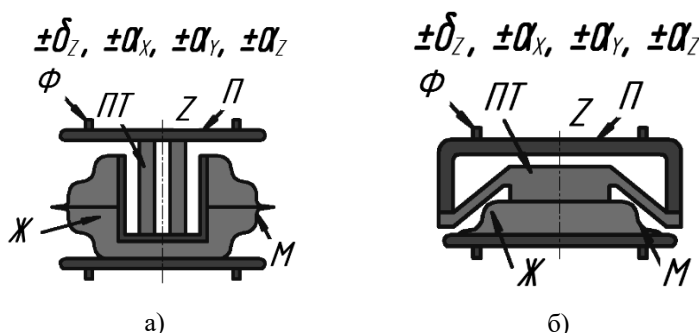


Рисунок 3 – Жидкостные мембранные пластинчато-торсионные МД

В конструкции МД (рис.3, б), расположенные с одинаковым окружным шагом упругие пластины ПТ, имеют Z – образную форму, а их концы закреплены в пазах кольцевого буртика верхней П и диска, прикрепленного к доньшку тарельчатой М.

Полости стакана и чашеобразной верхней П с упругими пластинами, заполнены медицинским упругим силиконом, обеспечивающим пластинам ПТ дополнительные демпфирующие свойства, повышение устойчивости в продольном направлении, а также предотвращающим скопление в полостях тканевой жидкости.

Угловая степень подвижности α_z эндопротеза МД на (а) обеспечивается за счет крутильных деформаций пластин ПТ, а эндопротеза на (б) – за счет изгибной деформации концов и крутильной деформации средних частей Z – образных пластин. Остальные три степени подвижности обеспечиваются за счет упругой деформации тарельчатых гофрированных М, находящихся под избыточным давлением Ж. Несущая способность таких МД в осевом направлении зависит от устойчивости и числа пластин, образующих ПТ.

Конструкции торсионных МД (рис. 4) характеризуются сравнительно меньшими габаритными размерами в осевом направлении, т.е. толщиной, и меньшей несущей способностью, чем у выше рассмотренных МД, и поэтому предназначены для установки в шейном отделе позвоночника, где требуется меньшая несущая способность.

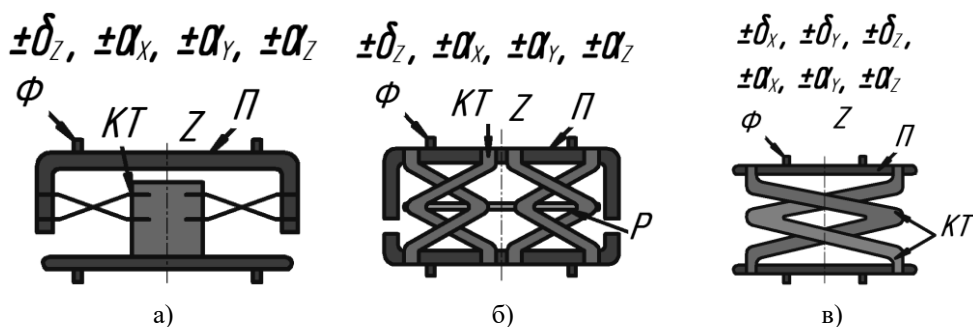


Рисунок 4 – Торсионные МД

ОЦМ эндопротеза МД (рис 4, а) образован расположенными с одинаковым окружным шагом Z – образными пружинами круглого сечения. Концы пружин закреплены в шахматном порядке в кольцевом буртике верхней и в ступице нижней пластин Π . Пружины работают на изгиб и кручение, т.е. являются круглыми торсионами (КТ), и обеспечивают эндопротезу МД четыре степени подвижности.

ОЦМ эндопротеза МД (рис.4, б) выполнен в виде набора расположенных с одинаковым окружным шагом в шахматном порядке V – образных пружин круглого сечения, отогнутые концы которых закреплены в зеркально выполненных в Π концентрично расположенных в два ряда отверстиях. Вершины пружин, закрепленных в отверстиях ближних к оси Π рядов, обращены наружу от нее, а дальних – к ней, и помещены в выемки плоского распорно-разделительного кольца (P).

ОЦМ шестистепенного эндопротеза МД (рис.4, в) выполнен в виде концентрично установленных соосно Π с гарантированным радиальным зазором трех винтовых одновитковых цилиндрических пружин разного диаметра (КТ) с круглым поперечным сечением витков, работающих на изгиб и кручение (на рис. показаны две пружины). Витки каждой пары КТ имеют противоположный угол наклона, что исключает их западание в межвитковые пространства. Отогнутые в осевом направлении концы пружин закреплены в расположенных на одинаковых угловых расстояниях отверстиях в Π . Выполнение соседних пружин с противоположными углами наклона витков ограничивает величину угловых перемещений α_z , т.к. при этом одна из пружин пары будет, закручиваясь, уменьшаться в диаметре, а вторая, раскручиваясь, – увеличиваться. Это приведет к выборке радиального зазора и образованию кинематической пары, обладающей повышенной жесткостью и устойчивостью. Упругие перемещения в направлении δ_x и δ_y могут осуществляться только в пределах гарантированного радиального зазора между витками соседних пружин.

Полости всех торсионных МД между Π заполнены упругим медицинским силиконом, улучшающим демпфирующие свойства МД с ОЦМ, образованными пружинами с круглым поперечным сечением витков.

В случаях хирургического вмешательства, требующих замены поврежденного болезнью или травмированного сегмента позвоночника, состоящего из позвонка и двух прилегающих межпозвонковых дисков, может быть использован жидкостный сильфонный сферическо-торсионный МД (рис.5) с четырьмя степенями подвижности. Он характеризуется повышенной несущей способностью ОЦМ, подвижное сферическое соединение которого помещено в герметичную полость, заполненную биоинертной антифрикционной жидкостью ($\mathcal{J}$) с наночастицами фуллерена C_{60} . Указанная полость образована сильфоном – гофрированной цилиндрической тонкостенной упругой в осевом направлении оболочкой (ΓO), прикрепленной одним концом к нижней опорной пластине (Π), и стаканом, прикрепленным к другому концу оболочки.

Угловые перемещения α_z обеспечиваются пластинчатым торсионом (ΠT), состоящим из набора прямоугольных пластин (плоских пружин), расположенных с одинаковым окружным

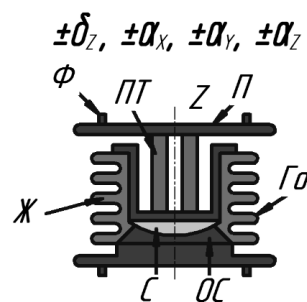


Рисунок 5 – Жидкостный сильфонный сферическо-торсионный МД

шагом внутри стакана и прикрепленных концами к его доньшку и к верхней П. Полость стакана заполнена упругим медицинским силиконом.

Для испытания имплантатов (эндопротезов) МД в лабораториях университетского учебно-научно-производственного комплекса разработан и изготовлен стенд (симулятор) (рис.6), состоящий из двух дисков 1 и 7, соединенных между собой стойками 3, выполняющими роль направляющих для подвижного в осевом направлении упорного диска 5, перемещаемого в процессе настройки стенда с помощью винта 6. На нижней плите 1 с помощью шаровых опор закреплены шесть попарно расположенных электромеханических штоковых сервомодулей 2 серии DNCE (FESTO) с шарико-винтовым передаточным механизмом и шаговым серводвигателем типа MTR-ST [11].

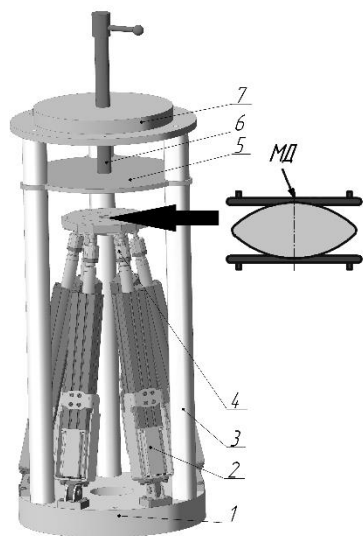


Рисунок 6 – Стенд для испытаний МД

К выходным штокам 4 передаточных механизмов сервомодулей прикреплена с помощью шаровых наконечников подвижная платформа, на которой устанавливается и закрепляется с помощью специального приспособления испытываемый эндопротез МД.

Платформа имеет шесть степеней подвижности – три линейных и три угловых, т.е. стенд представляет собой **гексапод** с микропроцессорной системой управления, с путевыми, силовыми датчиками и датчиками ускорения, обеспечивающий высокую разрешающую способность в отношении точности позиционирования.

Методические рекомендации по проведению экспериментальных исследований искусственных опорных элементов двигательной системы человека, и в частности МД, с использованием данного стенда, нашли отражение в работах [12, 13].

Выводы

Стенд спроектирован в соответствии с требованиями стандартов ISO, ГОСТ и ASTM, регламентирующих испытания имплантатов [14,15]. Эти стандарты определяют процедуру испытания на относительно угловые смещения между сочлененными компонентами и устанавливают схему действия прилагаемой силы, скорость и продолжительность испытания, конфигурацию образца и условия среды проведения испытания на износ дисков поясничного, грудного и шейного отделов позвоночника.

Испытываемый образец устанавливается в приспособлении с углом наклона его оси в сторону живота 10° (рис.1, а), которое затем закрепляется в центре подвижной платформы стенда.

При испытании шейных имплантатов МД аксиальная нагрузка F изменяется в пределах 50-150 N, а при испытании поясничных МД – в пределах 600-2000 N. Угловые перемещения α_x (в плоскости угла наклона оси МД): для шейных МД – от $-7,5^\circ$ до $+7,5^\circ$, для поясничных – от -3° до $+6^\circ$; угловые перемещения α_y (боковые): для шейных – от -6° до $+6^\circ$, для поясничных – от -2° до $+2^\circ$; угловые перемещения α_z (вращение): для шейных – от -4° до $+4^\circ$, для поясничных – от -2° до $+2^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровский В.И. Биомеханика: учеб. для вузов / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова. – М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2008. – 669с.
2. Образцов И.Ф. Проблемы прочности в биомеханике: учеб. пособие / И.Ф. Образцов, И.С. Адамович, А.С. Барер и др.; Под ред. И.Ф. Образцова. – М.: Высш. шк., 1988. – 311 с.
3. Педаченко Е.Г. Пункциональная вертебропластика / Е.Г. Педаченко, С.В. Куцаев. – Киев: Изд-во АЛД, 2005. – 517 с.
4. <http://ru-patent.info/20/80-84/2080841.html> (17.04.2015).
5. www.gmreis.com.
6. <http://ru-patent.info/21/40-44/2140229.html> (17.04.2015).

7. <http://www.rusmedserv.com/memorial/disk>.
8. Чурилов Г.Н. Фуллерены: Синтез и теория образования / Г.Н. Чурилов, Н.В. Булина, А.С. Федоров; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Новосибирск: Изд-во СОРАН, 2007. – 230 с.
9. Lashneva V.V. Physico-chemical properties of fullerene C₆₀ based coatings / V.V. Lashneva V.A., Dubok Ju.G., Tkachenko // Book of abstract, VIII International Conference – ICHMS' 2003, Sudak, Crimea, Ukraine, 14-20 Sept., 2003. – P.718-721.
10. New polys for old: contribution or caveat / S. Greenwald, T.W. Bauer, M.D. Ries / American Academy of orthopaedic surgeons. – 68th annual meeting, February 28 – March 4, 2001, San Francisco, California.
11. Automation technology – Electrical components: Cataloge, Festo AG & Co.KG, P.O.Box 73734 – Esslingen, Germany, 2010/11 Issue. – 1055 p.
12. Шидловский Н.С. Методы экспериментальных исследований систем фиксации, применяемых для лечения повреждений конечностей человека / Н.С. Шидловский // Материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 8-11 сентября 2009. – с. 88-96.
13. Poliakov A. Engineering Biomechanics – A Component of International Educational Project “FESTO-SYNERGY” / A. Poliakov, Y. Pashkov, B. Katalinic, M. Kalinin, V. Pakhaliuk // Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, Vienna, Austria, 2016. – P. 350-357.
14. ГОСТ Р ИСО 18192-1-2014. Имплантаты для хирургии. Износ полных протезов межпозвонковых дисков. Часть 1. Параметры нагружения и смещения для аппаратов для испытания на износ и соответствующие условия окружающей среды для испытаний.
15. ASTM F2346 – 05(2011). Standard Test Methods for Static and Dynamic Characterization of Spinal Artificial Discs.

REFERENCES

1. Dubrovskii V.I. Biomekhanika: ucheb. dlja vuzov / V.I. Dubrovskii, V.N. Fedorova. – M.: Izd-vo VLADOS-PRESS, 2008. – 669 s.
2. Obratsov I.F. Problemy prochnosti v biomekhanike: ucheb. posobie / I.F. Obratsov, I.S. Adamovich, A.S. Barer i dr.; Pod red. I.F. Obratsova. – M.: Vyssh. shk., 1988. – 311 s.
3. Pedachenko E.G. Punktional'naia ver-tebroplastika / E.G. Pedachenko, S.V. Kushcha-ev. – Kiev: Izd-vo ALD, 2005. – 517 s.
4. <http://ru-patent.info/20/80-84/2080841.html> (17.04.2015).
5. www.gmreis.com.
6. <http://ru-patent.info/21/40-44/2140229.html> (17.04.2015).
7. <http://www.rusmedserv.com/memorial/disk>.
8. Churilov G.N. Fullereny: Sintez i teoriiia obrazovaniia / G.N. Churilov, N.V. Bu-lina, A.S. Fedorov; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, Novosibirsk: Izd-vo SORAN, 2007. – 230 s.
9. Lashneva V.V. Physico-chemical properties of fullerene C₆₀ based coatings / V.V. Lashneva V.A., Dubok Ju.G., Tkachenko // Book of abstract, VIII International Conference – ICHMS' 2003, Sudak, Crimea, Ukraine, 14-20 Sept., 2003. – P.718-721.
10. New polys for old: contribution or caveat / S. Greenwald, T.W. Bauer, M.D. Ries / American Academy of orthopaedic surgeons. – 68th annual meeting, February 28 – March 4, 2001, San Francisco, California.
11. Automation technology – Electrical components: Cataloge, Festo AG & Co.KG, P.O.Box 73734 – Esslingen, Germany, 2010/11 Issue. – 1055 p.
12. Shidlovskii N.S. Metody eksperi-mental'nykh issledovaniy sistem fiksatsii, primeniaemykh dlja lecheniia povrezhdenii ko-nechnostei cheloveka / N.S. Shidlovskii // Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Sevastopol', 8-11 sentiabria 2009. – s. 88-96.
13. Poliakov A. Engineering Biomechanics – A Component of International Educational Project “FESTO-SYNERGY” / A. Poliakov, Y. Pashkov, B. Katalinic, M. Kalinin, V. Pakhaliuk // Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, Vienna, Austria, 2016. – P. 350-357.
14. GOST R ISO 18192-1-2014. Implantaty dlja khirurgii. Iznos polnykh protezov mezhpozvonkovykh diskov. Chast' 1. Paramet-ry nagruzheniia i smeshcheniia dlja apparatov dlja ispytaniia na iznos i sootvetstvuiushchie usloviia okruzhaiushchei sredy dlja ispytaniia.
15. ASTM F2346 – 05(2011). Standard Test Methods for Static and Dynamic Characterization of Spinal Artificial Discs.

Рецензент д.т.н., профессор Покинтелица Н.И.

УДК 621.99

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ПОДАЧИ ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ РЕЗЦОМ

А.С. Ямников¹, А.О. Чуприков², А.И. Харьков¹¹ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, Тула, Российская федерация²ОАО Тульский оружейный завод, Тула, Российская федерация

Получена 05.04.2016; Принята 04.07.2016

Аннотация

В статье описаны результаты экспериментальных исследований и их обработки при нарезании резьбы резцом на высокопрочных заготовках методом последовательных проходов. Приведены известные экспериментальные зависимости для твердосплавных пластин и показана необходимость получения аналогичных зависимостей для нарезания резьбы резцами, оснащенными режущей керамикой. Представлена оригинальная методика экспериментального определения так называемой «ломающей подачи». Получены значения ломающей подачи для керамики марок ВОК 60 и ВОК 71. Обосновано введение упрочняющей фаски с отрицательным задним углом на вершинной режущей кромке пластины.

Ключевые слова: нарезание резьбы резцом, метод последовательных проходов, режущая керамика, предельная подача.

MAXIMUM PERMISSIBLE FEED IN THE MULTIPASS THREAD CUTTING CUTTER

A. S. Yamnikov¹, A. O. Chuprikov², A. I. Kharkov¹¹FBGU IN Tula state University, g. Tula, Russian Federation²JSC Tula arms plant, g. Tula, Russian Federation

Received 05.04.2016; Accepted 04.07.2016

Abstract

The article describes the results of experimental studies and their processing during thread cutting cutter for high strength workpieces by the method of serial passages. Given the known experimental dependence of carbide inserts, and illustrates the need to obtain similar dependencies for threading cutters, equipped with cutting ceramics. The original technique for the experimental determination of the so-called "breaking serve". The values obtained in the breaking of the feeder for ceramic marks WOK 60 and WOK 71. Justified the introduction of the strengthening chamfer with a negative clearance angle at the vertex of the cutting edge

Keywords: thread cutting tool, method of successive passages, cutting ceramics, the marginal supply.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эксплуатационных характеристик изделий в современном машиностроении используют высокопрочные сплавы. Как следствие, снижается их технологичность [1, 2], что особенно актуально при нарезании резьбы на тонкостенных нежестких деталях типа полых тел вращения, приводя к повышенному изнашиванию инструмента и возникновению вибраций при обработке [3 – 11]. В Тульском государственном университете на протяжении десятилетий ведутся научные исследования по формообразованию резьб на телах вращения [12 – 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При назначении режимов резания для любого процесса обработки резанием вначале рекомендуется с учетом прочности инструментального материала и физико-механических обрабатываемого свойств материала назначать подачу, а затем с учетом режущих свойств инструментального материала – скорость резания. Спецификой многоходового резьбонарезания яв-

ляется неодинаковость подачи врезания на каждом из последующих проходов. Обычно последовательное положение режущей кромки инструмента во впадине нарезаемой резьбы называют схемой срезания припуска.

Существуют естественные ограничения по предельным подачам: при слишком большой подаче инструмент может сломаться, а при слишком маленькой – резание может перейти в выплачивание профиля резьбы. Резьбовой резец работает в таких условиях, при которых нагрузка на его вершинную и боковые режущие кромки различна. Вершина нагружена наиболее сильно и в этом месте происходит поломка резца и его интенсивное изнашивание.

Если принять величины подач по проходам как геометрическую прогрессию со знаменателем R_s , то по известной величине подачи первого прохода можно определить подачу на каждом проходе. При этом следует вначале определить возможные пределы варьирования подач. Максимальная подача будет лимитироваться прочностью режущего лезвия инструмента, а минимальная – сохранением режущих свойств режущего клина инструмента.

Подача первого прохода может быть определена по полученным ранее зависимостям между «ломающей» подачей и глубиной резания [19, 20] обрабатываемой стали 40X (HRC 46... 50) для твердого сплава Т30К4:

$$a_i = \frac{1307 R^{0,85}}{(HB)^{1,35} t_i^{0,7}}. \quad (1)$$

Для керамики очевидно зависимости д.б. другими. Поэтому требуется проведение специальных экспериментов. При обработке стали 35Х3НМ экспериментально получены величины «ломающих» подач, подтверждающих приведенные выше зависимости. Подача первого рабочего хода определялась при продольном точении конических заготовок с увеличенной осевой подачей S , равной имитируемому шагу резьбы, (рис. 1) как размер S_n , при котором произошла поломка вершины резьбовой пластины.

Зависимость параметра S_n от переднего угла для различных инструментальных материалов представлена на графике рис. 2.

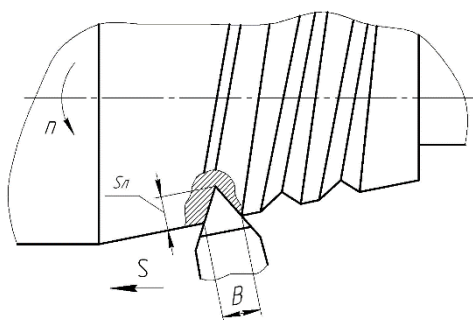


Рисунок 1 – Схема определения величины ломающей подачи на первом рабочем ходе

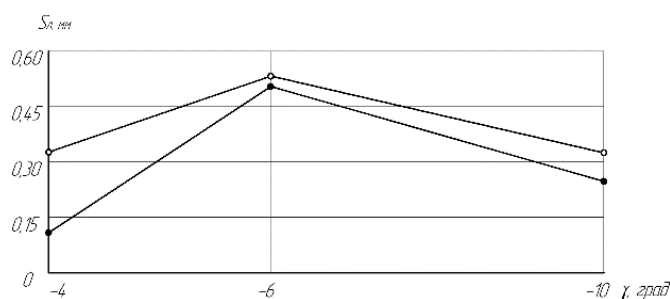


Рисунок 2 – Зависимость ломающей подачи от переднего угла и инструментального материала:
○ – ВК 71; ● – ВК 60

Из этих графиков следует, что с точки зрения прочности на первом проходе для керамики является оптимальный передний угол $\gamma = -6^\circ$ (для пластины с нулевым задним статическим углом что соответствует и заднему углу $\alpha_g = 6^\circ$).

В промышленности широко применяется двухсторонние сменные многогранные режущие пластины (СМП) с боковыми и переходными поверхностями, перпендикулярными передним (опорным) плоскостям, при пересечении которых образуются боковые и переходные кромки [ГОСТ 25003-81].

Для резьбовых резцов с механическим креплением применяется двухсторонние многогранные режущие пластины с боковыми и переходными поверхностями, перпендикулярными передним (опорным) плоскостям, при пересечении которых образуются боковые и переходные кромки. Данные пластины имеют нулевые задние углы по всему периметру режущих кромок (рис. 3).

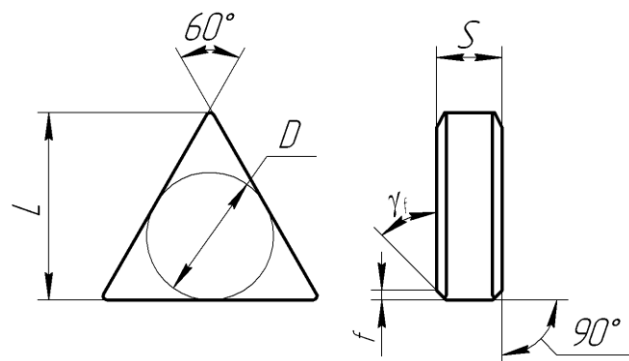


Рисунок 3 – Двухсторонняя СМП из керамики с нулевыми задними углами по всему периметру режущих кромок

Для получения необходимых при резании задних углов по боковым режущим кромкам пластину в резце наклоняют в плоскости, проходящей через биссектрису угла профиля перпендикулярно передним (опорным) плоскостям на угол $\alpha_{рв}$, равный заднему углу при вершине инструмента и в два раза больший требуемого заднего угла по боковым режущим кромкам $\alpha_{рб}$.

Для трехгранных пластин: $\alpha_{рв} = \arcsin \frac{\sin \alpha_{рб}}{\sin \phi}$, (для метрических резьб $2\phi = 60^\circ$; $\frac{1}{\sin \phi} = 2$). Зна-

чительное увеличение заднего угла резца на вершинном участке приводит к его ослаблению, что в сочетании с максимальным давлением стружки при резании именно на этот участок обуславливает неблагоприятное нагружение вершины инструмента и снижение надежности его работы. Наиболее сильно этот недостаток проявляется у инструментальных материалов с невысоким пределом прочности на изгиб, например, режущей керамики.

Мы предложили гипотезу, что для снижения отрицательного влияния изгибающего момента на прочность пластинки целесообразно уменьшить момент действия силы резания путем введения дополнительной упрочняющей фаски на задней поверхности с углом при вершине $\alpha_{\delta} < 0$. Величина угла режущего клина при этом соответственно увеличивается от $\beta_{\delta} = 90^\circ$ в точках *a* и *б* до $\beta_{\delta} = 90^\circ + \alpha_{пл.г}$ в вершине пластины. Таким образом, формируют все шесть вершин двухсторонней пластины.

Работа с режущей сменной многогранной пластиной из керамики осуществляется аналогично обыкновенной СМП: в гнездо резца, установленного на станке, устанавливают и закрепляют СМП. После чего осуществляют обработку заготовки.

Предложенное техническое решение позволяет повысить надежность работы инструмента и увеличить период его стойкости, увеличить подачи врезания на проходах и, как следствие, сократить число проходов при нарезании винтовых поверхностей, а, следовательно, время и стоимость обработки. Сохранить основное преимущество двухсторонних пластин – возможность использования двух периметров режущих кромок за счёт поворота пластин вокруг осей перпендикулярной и параллельной передней поверхности.

Для получения задних углов по боковым сторонам пластины, ее необходимо устанавливать в державке резца под углом, определённым зависимостью:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\delta} = \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} \sin \phi, \quad (2)$$

где α_{δ} задний угол по боковым сторонам профиля; α_{ϵ} задний угол при вершине; 2ϕ – угол профиля, для метрических резьб $2\phi = 60^\circ$, $\sin \phi = \frac{1}{2}$, поэтому $\alpha_{\delta} = 2\alpha_{\epsilon}$.

При назначении задних углов следует учитывать угол подъема резьбы μ , который определяется зависимостью:

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{P}{\pi \cdot D}, \quad (3)$$

где P – шаг нарезаемой резьбы, D – диаметр резьбы.

Использование предлагаемой пластины позволит за счёт уплотнения вершинных участков повысить надёжность работы резбовых резцов, увеличить подачи врезания на проходах и, как следствие, сократить число проходов при нарезании резьб.

Для проверки высказанного предположения проводились эксперименты по определению максимально допустимой толщины срезаемого слоя, при которой происходит хрупкое разрушение режущей пластины.

Для сравнительных испытаний выбраны трёхгранные пластины со стандартной геометрией тип (19 7612.0352.160403 ГОСТ 25003-81) из режущей керамики ВОК 60 и пластина предлагаемой конструкции из того же материала, которые механически закрепляли в державке резца.

Геометрические параметры: передний угол в плоскости, проходящей через биссектрису угла профиля: $\gamma_g = 10^\circ$; угол профиля: $\varphi = 60^\circ$; величина упрочняющей фаски: $f = 0,2 + 0,05 \text{ мм}$; угол наклона фаски: $\gamma_f = -10^\circ + 1^\circ$.

Задние углы для стандартной пластины: $\alpha_g = 10^\circ$, $\alpha_o = 5^\circ$; для предлагаемой пластины: $\alpha_g = \alpha_o = 5^\circ$.

Радиусные участки профиля обоих типов пластин затачивали в специальном приспособлении. Все пластины были из одной партии. Величину радиуса контролировали на микроскопе БВ2010. Величина $R = 0,3 \pm 0,02 \text{ мм}$. Эксперименты проводились на станке мод. 16К20.

Режимы резания: частота вращения $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; скорость резания $V = 125 \text{ м/мин}$:

Определение максимально допустимой толщины срезаемого слоя, при которой происходит хрупкое разрушение режущей части пластин, проводили методом «ломающих» подач на врезание при обработке резьбы М40х1,5 на деталях из стали 35ХЗНМ НRC 52...54.

«Ломающая» подача последующих проходов определялась при врезании резбового резца с поперечной подачей и определялась шириной B среза, при котором происходила поломка резбовой пластины.

Метод заключался в следующем:

– высоту профиля t_p делили на 4 интервала с соответствующими глубинами предварительных врезаний t_i : $t_1 = 0$; $t_2 = 0,22$; $t_3 = 0,44$; $t_4 = 0,66$;

– при каждом значении t_i нарезали резьбу с определенным значением подач врезания S_i , которую для каждого опыта увеличивали дискретно через 0,05 мм до значения S_{il} , при котором происходили выкрашивания или сколы режущего лезвия.

Для каждого опыта брали новую режущую кромку. При испытаниях были получены значения «ломающих» подач врезания для пластин предлагаемой и стандартной геометрии, которые представлены в (табл. 1).

Таблица 3.1 – Значения ломающих подач при различной глубине предварительного врезания

Величины предварительного врезания		$t_{i \text{ предв}}$, мм	0	0,22	0,44	0,66
Значение «ломающей подачи» для пластин	предлагаемой геометрии	S_{il} , мм	0,43	0,35	0,30	0,27
	стандартной геометрии		0,25	0,20	0,18	0,15

По полученным данным в двойных логарифмических координатах построены графики зависимости «ломающих» подач S_{il} от высоты профиля резьбы t_i .

Анализ результатов испытаний показывает, что значения «ломающих» подач для пластин предложенной геометрии на всех глубинах предварительного врезания t_1 ; t_2 ; t_3 ; t_4 больше, чем для пластин со стандартной геометрии в 1,7...1,6 раза, причем наиболее значительно это проявляется на меньших глубинах профиля резьбы.

По аналогии с формулой Антонова Н.П. [18], зависимость будем искать в виде:

$$S_{iz} = \frac{C_s}{t_i^{z_s}}, \quad (4)$$

где C_s – постоянная для данного материала обрабатываемой заготовки, а также геометрии режущей пластины и её материала, z_s – показатель степени при глубине врезания t_i , причем под t_i понимается сумма предварительного врезания и ломающей подачи, т.е. величина, на которой происходит поломка пластики $t_i = t_{i\text{предв}} + S_{iz}$. Это же обстоятельство учтено на графиках (рис. 4).

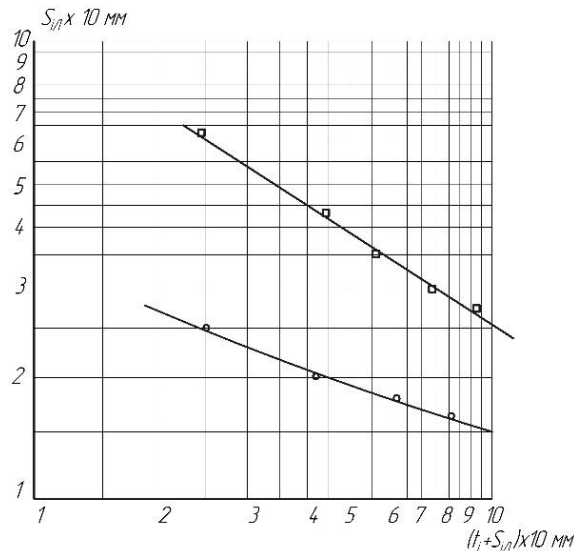


Рисунок 4 – Графики зависимости ломающих подач от глубины предварительного врезания:

○ – пластина стандартной геометрии; □ – пластина предлагаемой геометрии

Для получения аналитической зависимости вида (4) воспользуемся методом наименьших квадратов. В этом случае исходными данными будут результаты опытов, представленных в (табл. 1). Этот метод позволяет получить параметры зависимости любой сложности, но для избегания погрешности решения нелинейных уравнений желательно прологарифмировать зависимость (4), вследствие чего она примет линейный вид

$$\ln(S_{iz}) = \ln(C_s) - z_s \cdot \ln(t_i). \quad (5)$$

Введем для неизвестных параметров обозначения:

$$x = \ln(C_s), \quad y = z_s,$$

тогда выражение (3.6) примет вид

$$\ln(S_{iz}) = x - y \cdot \ln(t_i). \quad (6)$$

Метод наименьших квадратов минимизирует погрешность аппроксимации исходных данных аналитической зависимостью:

$$\Phi = \sum_{i=1}^4 (x - y \cdot \ln(t_i) - \ln(S_{iz}))^2 \rightarrow \min.$$

При нахождении минимума функции следует взять частные производные по каждому параметру и приравнять нулю. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений относительно переменных x и y

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 4x - y \sum_{i=1}^4 \ln(t_i) - \sum_{i=1}^4 \ln(S_{iz}) = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -x \sum_{i=1}^4 \ln(t_i) + y \sum_{i=1}^4 \ln(t_i^2) - \\ - \sum_{i=1}^4 \ln(S_{iz}) \cdot \ln(t_i) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

В результате подстановки в формулу (7) данных из (табл. 2) получим систему

$$\begin{cases} 4x + 1,77y + 4,4 = 0; \\ 1,77x + 1,11y + 1,74 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Решения уравнения системы (8) позволяют получить аналитическую зависимость ломающей подачи от глубины врезания в случае резания пластинкой предлагаемой геометрии

$$S_{il} = \frac{0,25}{t_i^{0,63}}. \quad (9)$$

Для случая резания стандартной пластинкой воспользуемся значениями (табл. 3) и получим систему:

$$\begin{cases} 4x + 2,95y + 6,61 = 0; \\ 2,95x + 2,96y + 4,55 = 0, \end{cases} \quad (10)$$

решения которой позволят нам получить искомую показательную зависимость

$$S_{il} = \frac{0,14}{t_i^{0,41}}. \quad (11)$$

Преобразуем (табл. 1) к виду, более приемлемому для аппроксимации функции (табл. 2 и 3).

Таблица 2 - Значения ломающих подач при различной глубине суммарного врезания и их натуральные логарифмы для пластины предлагаемой геометрии

Параметры	Обозначение	Номер опыта				Σ
		1	2	3	4	
Величина предварительного врезания	$t_{i\text{предв}}$, мм	0	0,22	0,44	0,66	
Величина полного врезания	$t_i = t_{i\text{предв}} + S_{il}$	0,43	0,57	0,74	0,93	
Величина “ломающей подачи”	S_{il} , мм	0,43	0,35	0,3	0,27	
Логарифм величины полного врезания	$\ln t_i$	- 0,84	- 0,56	-0,3	- 0,07	- 1,77
Логарифм величины ломающей подачи	$\ln S_{il}$	- 0,84	- 1,05	-1,2	- 1,31	-4,4

Таблица 3 – Значения ломающих подач при различной глубине суммарного врезания и их натуральные логарифмы для пластины стандартной геометрии

Параметры	Обозначение	Номер опыта				Σ
		1	2	3	4	
Величина предварительного врезания	$t_{i\text{предв}}$, мм	0	0,22	0,44	0,66	
Величина полного врезания	$t_i = t_{i\text{предв}} + S_{il}$	0,25	0,42	0,62	0,81	
Величина “ломающей подачи”	S_{il} , мм	0,25	0,2	0,18	0,15	
Логарифм величины полного врезания	$\ln t_i$	- 1,39	- 0,87	- 0,48	- 0,21	- 2,95
Логарифм величины ломающей подачи	$\ln S_{il}$	- 1,39	- 1,61	- 1,71	-1,9	- 6,61

Выводы

Найденные зависимости (9) и (10) позволяют разработать так называемую равнопрочностную схему вырезания припуска, при которой запас прочности режущего лезвия на каждом проходе одинаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямникова О.А., Троицкий Д.И., Балашева Ю.В. Комплексная оценка технологичности деталей типа тел вращения // СТИН. 2008. № 6. С. 23-25.
2. O. A. Yamnikova, D. I. Troitsky, YU.V's Balasheva/ Evaluating The Design of Parts In The Form of Solids of Revolution // Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – № 9. – С. 910-912.
3. Чуприков А.О., Ямников А.С. Моделирование погрешностей закрепления тонкостенных сварных корпусов в трехкулачковых патронах // Научные технологии в машиностроении. 2014, №8-2. С. 18-22.
4. Ямников А.С., Чуприков А.О., Харьков А.И. Повышение производительности точения резьбы резцами с керамическими пластинками // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2014. Т. 14. № 4. С. 37-45.
5. Ямников А.С., Чуприков А.О., Харьков А.И. Повышение ресурса инструмента при нарезании усиленной упорной резьбы на заготовках из высокопрочных материалов / СТИН, 2015, №6. С. 17-21
6. A.S. Yamnikov and A. O. Chuprikov. Chucks for Thin – Walled Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. Vol. 35 No. 11, 2015. PP 838-840. © Allerton Press, Inc., 2015. DOI: 10.3103/S1068798X15110179.
7. A.S. Yamnikov, A. O. Chuprikov and A. I. Kharkov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks/ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956. © Allerton Press, Inc., 2015. DOI 10.3103/S1068798X15110179. <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X15110179>.
8. Ямников А.С., Ямникова О.А. Экспериментальное определение силы резания при фрезоточении резьбы // Известия ТулГУ, Технические науки, 2015. Вып. 1. С. 82-93.
9. Харьков А.И., Чуприков А.О., Ямников А.С. Аналитическое определение составляющих силы резания при точении // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов МНТК «АПИР-19», 13-14 сентября 2014 года Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 107-112.
10. Нгуен Ван Кыонг, Ямников А.С. Методология оптимизации режимов резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 1 (291) 2012. С.56-63.
11. G.T. Bykov, O.A. Yamnikova, N.B. Dorokhin, A.S. Yamnikov. Vibrational stability in turning thin-walled pipe by multicutter heads // (2010) Russian Engineering Research, 30 (3). – PP. 296 – 299.
12. Солянкин Д.Ю., Ямников А.С. Относительная производительность фрезоточения резьб / Известия Орел-ГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. №6 (284) 2010. С. 109-114.
13. Солянкин Д.Ю., Ямников А.С. Экспериментальные исследования сил резания при фрезоточении резьбы / Известия Юго – Западного государственного университета. серия «Технические науки». 2011, №1 (34). С. 113-120.
14. Резец с поворотной державкой / Е.Ю. Кузнецов, А.С. Ямников, А.А. Маликов [и др.] / Патент РФ на полезную модель RU 106160U1, МПК В23В 29/00. Опубликовано 10.07.2011. 4 с.
15. Ямникова О.А., Солянкин Д.Ю. Ямников А.С. Имитационное моделирование фрезоточения резьбы / Научные технологии в машиностроении. 2011, №5, с.3-13
16. Сандгартен И.Л., Маликов А.А., Ямников А.С. Метчики для нарезания трапецидальных резьб. Проектирование и технология изготовления / Монография, Изд-во Ламберт, ФРГ. 2012. 143 с.
17. Солянкин Д.Ю. Ямников А.С. Ямникова О.А. Фрезоточение резьб. Обоснование технологии и конструкций инструмента / Монография, Изд-во Ламберт, ФРГ. 2012. 176 с.
18. Денисов В.Г., Федин Е.И., Ямников А.С. Влияние геометрии резьбовых резцов с режущей керамикой на точность профиля резьбы и силы резания / Сб. науч. тр. «Исследования в области технологии механической обработки и сборки». Тула, ТПИ, 1985. С. 69-75.
19. Антонов Н. П. Скоростное нарезание резьбы резцами методом последовательных проходов // Технология машиностроения: Сб. науч. трудов. Тула: ТулПИ, 1971. Вып. 23. С. 17-28.
20. Бобров В. Ф. Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом / М.: Машиностроение, 1982. 104 с.

REFERENCES

1. O. A. Yamnikova, D. I. Troitsky, YU.V's Balasheva/. A complex assessment of technological effectiveness of details like rotation bodies//STIN. 2008. No. 6. Page 23-25.
2. O. A. Yamnikova, D. I. Troitsky, YU.V's Balasheva / Evaluating The De-sign of Parts In The Form of Solids of Revolution //Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – NO. 9. – PAGE 910-912.
3. A.O. Chuprikov, A.S. Yamnikov Modeling of errors of fixing of thin-walled welded cases in three-cam cartridges//High technologies in mechanical engineering. 2014, No. 8-2. P/ 18-22.
4. Yamnikov A.S., Chuprikov A.O., Kharkiv A.I. Increase of productivity of turning of a carving cutters with ceramic plates//the Bulletin of the Southern Ural state university. Series: Mechanical engineering. 2014. T. 14. No. 4. Page 37-45.
5. Yamnikov A.S., Chuprikov A.O., Kharkiv A.I. Increase of a resource of the tool when cutting of the strengthened persistent carving on preparations from high-strength materials / STIN, 2015, No. 6. Page 17-21.
6. A.S. Yamnikov and A. O. Chuprikov. Chucks for Thin – WALLED BLANKS/ISSN 1068-798X, RUSSIAN ENGINEERING RESEARCH. Vol. 35TH No. 11, 2015. PP 838-840. © Allerton Press, Inc., 2015. DOI: 10.3103/S1068798X15110179.
7. A.S. Yamnikov, A. O. Chuprikov and A. I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks/ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956. © Allerton Press, Inc., 2015. DOI 10.3103/S1068798X15110179.(<http://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X15110179>).
8. Yamnikov A.S., Yamnikova O. A. Experimental determination of force of cutting at a carving turn milling process //Izvestiya TULGU, Technical science, 2015. Issue 1. P. 82-93.

9. Kharkiv A.I., Chuprikov A.O., Yamnikov A.S. Analytical definition of components of force of cutting at tochenii./the Messenger of TULGU. Automation: problems, ideas, decisions: Collection of scientific works of MNTK "APIR-19", on September 13-14, 2014 Tula: Publishing house of TULGU, 2014. Page 107-112.
10. Nguyen Wang Kyong, A.S. Yamnikov. Methodology of optimization of the modes of cutting//Fundamental and applied problems of equipment and technology. No. 1 (291) 2012, p. 56-63.
11. G.T. Bykov, O.A. Yamnikova, N.B. Dorokhin, A.S. Yamnikov. Vibrational stability in turning thin-walled pipe by multicutter heads // (2010) of Russian Engineering Research, 30 (3). – PP. 296 – 299.
12. D.Yu. Solyankin, A.S. Yamnikov. Relative productivity of a turn milling process of carvings / News of ORELGTU. Fundamental and applied problems of equipment and technology. No. 6 (284) 2010. P. 109-114.
13. D.Yu. Solyankin, A.S. Yamnikov. Pilot studies of forces of cutting at a turn milling process of carving / News of Hugo – the Western state university. Technical science series. 2011, No. 1 (34). P. 113-120.
14. A cutter with a rotary derzhavka / E.Yu. Kuznetsov, A.S. Yamnikov, A.A. Malikov [etc.] / Russian Federation Patent for the useful model RU 106160U1, MPK V23V 29/00. It is published 7/10/2011. 4 p.
15. O. A. Yamnikova, D.Yu. Solyankin, A.S. Yamnikov. Imitating modeling of a turn milling process of a carving / High technologies in mechanical engineering. 2011, No. 5, p 3-13.
16. I.L. Sandgarten, A.A. Malikov. A.S/ Yamnikov. Taps for cutting of trapezoidal carvings. Design and manufacturing techniques / Monograph, Publishing house Lambert, Germany. 2012. 143 p.
17. D.Yu. Solyankin, O. A. Yamnikova, A.S. Yamnikov. Frezotocheniye of carvings. Justification of technology and designs tool / Monograph, Publishing house Lambert, Germany. 2012. 176 p.
18. V. G. Denisov, E.I. Fedin, A.S. Yamnikov. Influence of geometry of carving cutters with the cutting ceramics on the accuracy of a profile of a carving and force of cutting / Sb. науч. тр. "Researches in the field of technology of machining and assembly". Tula, TPI, 1985. P. 69-75.
19. N. P. Antonov. High-speed cutting of a carving cutters by method of consecutive passes // Technology of mechanical engineering: Collection of scientific works. Tula: ТулПИ, 1971. Issue 23. P. 17-28.
20. V. F Bobrov. Multipass cutting of fixing carvings cutter / М.: Mechanical engineering, 1982. 104 p.

Рецензент к.т.н., доц. Канареев Ф.Н.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов
Выпуск 1
2016

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163
E-mail: vst_sevsu@mail.ru

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Парадигмы истории и общественного развития» обязательна.

Подписано в печать 5.05.2016. Формат 60×84/8. Заказ № 93. Усл. печ. л. 10,16. Уч.-изд. л. 8,23. Тираж 50 экз. Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Сольна».