

Секция № 9
ПОСТЕРНАЯ СЕКЦИЯ

**УПРАВЛЕНИЕ МАШИНАМИ И РОБОТАМИ: СОЗДАНИЕ
МИВАРНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОНОМНЫМИ ТРАКТОРАМИ И СПЕЦМАШИНАМИ МЧС**
*CONTROL OF VEHICLES AND ROBOTS: CREATING MIVAR DECISION
MAKING SYSTEMS FOR CONTROL OF AUTONOMOUS TRACTORS AND
SPECIAL VEHICLES OF EMERCOM*

Аладин Д.В.^{1,2} – студент, **Варламов О.О.**^{1,2} – д-р. техн. наук, профессор, **Чувиков Д.А.**² – канд. техн. наук, **Адамова Л.Е.**³ – канд. психол. наук, доцент, **Сараев Д.В.**^{1,2} – аспирант
¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.

Баумана»

²НИИ МИВАР

³АНО ВО «Российский новый университет»

aladin.dv@yandex.ru

Abstract. The article demonstrates the scientific groundwork for the use of the mivar technologies to control autonomous tractors and special vehicles of EMERCOM. The decision-making system of "ROBO!RAZUM" can in real time manage multi-level heterogeneous robotic systems to perform complex actions in conditions of heterogeneous dynamic obstacles and adaptive solution of tasks even with faulty technical vision. The paper identifies the main complexities of the "Tractors" problems, which are successfully solved by the mivar decision making systems for controlling vehicles and robots.

Key words: mivar, mivar nets, artificial intelligence, autonomous road vehicles, decision making system, Wi!Mi, robotic systems, cyber-physical systems.

Аннотация. Показан научный задел по применению миварных технологий для управления автономными тракторами и спецмашинами МЧС. Системы принятия решения «РОБО!РАЗУМ» могут в реальном времени управлять многоуровневыми гетерогенными робототехническими комплексами для выполнения сложных действий в условиях разнородных динамических препятствий и адаптивным решением поставленных задач даже при неисправном техническом зрении. Выявлены основные сложности комплекса задач "трактора", которые успешно решаются миварными системами принятия решений для управления машинами и роботами.

Ключевые слова: мивар, миварные сети, искусственный интеллект, машины, системы принятия решений, КЭСМИ, робототехнические системы, киберфизические системы.

Миварные системы принятия решений для управления машинами и роботами являются развитием миварных технологий, которые сначала были предназначены для создания эволюционных баз данных и правил для адаптивного синтеза интеллектуальных систем [1] в научной области искусственный интеллект (ИИ). Частным случаем таких систем являлись самоорганизующиеся комплексы оперативной диагностики [2]. Только в 2017 году был получен патент на автоматизированное построение маршрута логического вывода в миварной базе знаний [3], который лежит в основе миварных экспертных систем (МЭС). Универсальность применения МЭС позволила говорить о возможности качественного перехода на новый уровень в области искусственного интеллекта [4] и решения широкого спектра практических задач [5] с линейной вычислительной сложностью [6]. Конструктор (оболочка) экспертных систем КЭСМИ Wi!Mi "РАЗУМАТОР" [7] создан и внесен в Реестр Российского программного обеспечения. Создание "РАЗУМАТОРА" позволило реализовать на практике теоретическую гипотезу 2004 года о взаимодействии групп мобильных роботов на основе миварного информационного пространства [8]. Вместе с этим было предложено в качестве метрики

автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов (РТК) и киберфизических систем (КФС) использовать метрику продукционных экспертных систем [9], где количество N элементарных правил "Если, То" определяет возможное количество комбинаций в пространстве принятия решений, равное факториалу от N ($N!$). Такое огромное пространство принятия решений является главным ограничением для "умных" машин и роботов, поэтому и было предложено добавить к известным системам траекторного управления автомобилями новый блок: "системы принятия решений" (СПР) [10] на основе миварных технологий логического искусственного интеллекта [11].

В связи с тем, что настоящие автономные автомобили еще только создаются и есть много юридических ограничений на их использование, было принято решение исследовать технологии СПР в проекте по созданию миварных систем контроля за соблюдением правил дорожного движения [12] на основе "Разуматоров" и миварных экспертных систем [13]. В процессе изучения правил дорожного движения и сравнения их с задачей планирования поведения роботов и машин в пространстве состояний на примере известного STRIPS-программирования [14] была создана качественно новая технология МИПРА (MIPRA) для решения задач планирования действий робототехнических комплексов в реальном времени [15], использование которой позволило на несколько порядков ускорить решение задачи "перестановки кубиков в пирамидах". Например, для перестановки 300 произвольных кубиков МИПРА находит алгоритм решения менее, чем за 90 секунд на обычном серийном ноутбуке [15]. Кроме того, напомним, что именно применение миварных экспертных систем позволило на практике создать виртуального русскоязычного текстового консультанта в банковской сфере [16], что позволит создать для машин и роботов систему понимания русских текстов для взаимодействия с людьми и между собой. Теперь желание "поговорить с роботом" и поставить ему задачу точно также, как своему человеку-помощнику вполне реальна. Если же автономные машины или роботы при движении по дорогам попадут в дорожно-транспортное происшествие (ДТП), то и здесь миварные технологии позволят реконструировать события [17] и выявить нарушителя на основе объективных данных и логико-вычислительной обработки.

Таким образом, создан большой научный задел по возможности применения миварных технологий для управления автономными тракторами и спецмашинами МЧС.

Системы принятия решений для управления роботизированными тракторами

Проведенный анализ информации различных Заказчиков, актуальных предметных областей применения тракторов и спецмашин МЧС позволил определить границы и задачи для миварных систем принятия решений. Трактора, спецмашины и РТК на их основе используются для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и природных катастроф. Такие задачи предъявляют повышенные требования к системам управления (СУ) и порождают большое разнообразие ситуаций. Отметим, что необходима полная автономность РТК при отсутствии каналов связи с операторами, что бывает достаточно часто в чрезвычайных ситуациях. Учитывая возможности миваров и скорость принятия решений >5 млн правил/с, такое расширение требований к СУ не критично. По нашим оценкам, количество продукционных правил для подобных задач не будет превышать сотен тысяч штук. Для краткости будем называть этот комплекс задач МЧС "трактора".

Выявлены следующие важные особенности комплекса задач "трактора":

1) Тракторы и РТК на их основе перемещаются по территории, где динамически изменяются как пути перемещения, так и препятствия на них, а также рельеф местности.

2) РТК являются сложными многоуровневыми устройствами, когда часть такого РТК или отдельный мини-РТК может автономно выполнять некоторые задачи: беспилотный летающий аппарат (БПЛА) исследовать зону МЧС сверху и создавать актуальные карты.

3) В тракторах системы технического зрения (СТЗ) бывают внешними, когда они перемещаются по "полю" при плохой видимости или при неисправности своей СТЗ. Тогда

трактора будут использовать заранее загруженную в СПР "карту", которая оперативно обновляется по данным с внешних СТЗ и с внутренних инерционных датчиков.

4) Трактора могут работать вместе и помогать друг другу решать комплексные задачи (групповое управление РТК). Например, два трактора могут вместе перемещаться по пересеченной местности и если первый трактор "попадает в болото", то второй трактор может вытащить его. Если РТК ломается, то другой может подъехать к нему, провести диагностику и отремонтировать.

5) Интеллектуальные возможности миварных СПР порождают и новые требования к РТК – «тракторам», которые должны быть способны взаимодействовать друг с другом как физически, так и информационно. Например, РТК могут обмениваться информацией по разным физическим каналам, включая оптику по аналогии с людьми. РТК могут сближаться и по специальному «кабелю» подключаться к друг другу.

6) Трактора должны уметь работать с разными типами препятствий. Например, уже решена задача разделения типов препятствий на два вида: проходимые и непроходимые. Введем третий тип препятствия, который будем называть «сдвигаемое препятствие». Итак, возможно достаточно большое и даже «открытое» множество видов различных препятствий, но все они могут быть учтены в базе знаний миварной СПР, а затем и в работе РТК и их многоуровневых и разнородных группировок.

7) Трактора должны уметь выполнять задачи даже в условиях, когда система технического зрения вышла из строя или не может функционировать из-за погодных условий. В каждом РТК есть карта местности и система инерционных датчиков, которые точно определяют все перемещения РТК и его положение в пространстве. Первый вариант: без зрения на основе ранее загруженной карты строится маршрут и выполняется перемещение по нему на основе информации инерционных датчиков. Если первый РТК упирается в препятствие на свободной дороге, то запускается процедура поиска объезда, которая будет описана в последующих работах.

Пусть у группы РТК есть общая карта и задача по перемещению груза через зону ЧС, где произошли изменения в рельефе и появились препятствия. Трактора объединяют системы технического зрения всех РТК и выполняют актуализацию информации для обновления карты местности. Создается миварный двудольный граф возможных перемещений, где явно выделяются «вершины» – в которых могут находиться РТК и «ребра» – по которым РТК могут перемещаться из одной вершины в другую. Далее группировка РТК в миварной СПР находит маршрут движения, определяет препятствия и по правилам из своей базы знаний выполняет действия по перемещению грузов, если маршрут свободен. Если есть проходимые или сдвигаемые препятствия, то выполняется планирование действий по преодолению этих препятствий и выполнению задачи. Необходимые научные исследования проведены и можно переходить к этапу создания баз знаний и обучения миварных СПР для автономных тракторов и спецмашин МЧС.

Выводы

Определенные элементы искусственного интеллекта уже созданы и миварные системы принятия решения «РОБО!РАЗУМ» могут управлять автономными тракторами и спецмашинами МЧС, которые представляют собой многоуровневые сложные гетерогенные робототехнические комплексы. Эти автономные РТК смогут выполнять задачи и перемещаться в пространстве даже при неисправном техническом зрении РТК с выполнением сложных действий в пути, с возможным использованием внешних систем технического зрения и внутренней картой возможных перемещений в условиях разнородных динамических препятствий и адаптивным решением поставленных задач.

Литература

1. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. - М.: Радио и связь,

2002. - 288 с. ISBN 5-256-01650-4.

2. Варламов О.О. Системный анализ и синтез моделей данных и методы обработки информации в самоорганизующихся комплексах оперативной диагностики // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Москва, 2003. - 307 с.
3. Варламов О.О., Хадиев А.М., Чибирова М.О., Сергушин Г.С., Антонов П.Д. Автоматизированное построение маршрута логического вывода в миварной базе знаний // Патент на изобретение RUS 2607995 11.02.2015., опубликовано 11.01.2017, бюл. №2.-43 с.
4. Варламов О. О. Миварный подход как основа качественного перехода на новый уровень в области искусственного интеллекта // Радиопромышленность. 2017. №4. С.13-25.
5. Ostroukh A., N. Surkova, O. Varlamov, V. Chernenky, A. Baldin, Automated process control system of mobile crushing and screening plant // Journal of Applied Engineering Science. - 2018. - 16(3). - Pp. 343-348. DOI: 10.5937/jaes16-15586.
6. Varlamov O. O. Exhaustive elementary-incremental summing up of numbers with linear computational complexity // Avtomatizatsiya i Sovremennye Tekhnologii. 2003. №1. Pp.34-41.
7. Varlamov O.O. Wi!Mi Expert System Shell as the Novel Tool for Building Knowledge-Based Systems with Linear Computational Complexity // International Review of Automatic Control, 2018, 11(6), 314-325. DOI: 10.15866/ireaco.v11i6.15855.
8. Варламов О.О. Системы обработки информации и взаимодействие групп мобильных роботов на основе миварного информационного пространства // Искусственный интеллект. 2004. № 4. С. 695—700.
9. Варламов О.О. О метрике автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов и киберфизических систем // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 74-86.
10. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence // Journal of Advanced Transportation. - 2017. - Vol. 2017. - 10 p. DOI: 10.1155/2017/2492765.
11. Varlamov O.O., Chuvikov D.A., Aladin D.V., et al. Logical artificial intelligence Mivar technologies for autonomous road vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - 534(1). - 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012015.
12. Варламов О.О., Аладин Д.В. О создании миварных систем контроля за соблюдением правил дорожного движения на основе "Разуматоров" и экспертных систем // Радиопромышленность. - 2018. - № 28(2). - С. 25-35. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-2-25-35.
13. Aladin D. V., O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov, et al. Logic-based artificial intelligence in systems for monitoring the enforcing traffic regulations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - 534(1). - 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012025.
14. Варламов О.О., Аладин Д.В. О применении миварных сетей для интеллектуального планирования поведения роботов в пространстве состояний // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2 (86). С. 75-82.
15. Варламов О.О., Аладин Д.В. Успешное применение миварных экспертных систем для МIPRA - решения задач планирования действий робототехнических комплексов в реальном времени // Радиопромышленность. - 2019. - № 29(3). - С. 15-25. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-15-25.
16. Адамова Л.Е., Варламов О.О., Осипов В.Г., Чувииков Д.А. О практической реализации миварного виртуального русскоязычного текстового консультанта в банковской сфере // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2 (86). С. 10-17.
17. Chuvikov D.A., Varlamov O.O., Aladin D.V., et al. Mivar models of reconstruction and expertise of emergency events of road accidents // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - 534(1). - 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012007.

УПРАВЛЕНИЕ МАШИНАМИ И РОБОТАМИ: СОЗДАНИЕ БАЗ ЗНАНИЙ ДЛЯ МИВАРНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РОБОТОВ И АВТОМОБИЛЕЙ

*CONTROL OF VEHICLES AND ROBOTS: CREATING OF KNOWLEDGE
BASES FOR MIVAR DECISION MAKING SYSTEMS ROBOTS AND VEHICLES*
Аладин Д.В.^{1,2} – студент, Варламов О.О.^{1,2} – д-р. техн. наук, профессор, Адамова Л.Е.³ –
канд. психол. наук, доцент, Чувилов Д.А.² – канд. техн. наук, Сараев Д.В.^{1,2} – аспирант
¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени

Н.Э. Баумана»

²НИИ МИВАР

³АНО ВО «Российский новый университет»

aladin.dv@yandex.ru

Abstract. An important element of vehicle and robot control is a decision-making system based on production rules and cause-and-effect relationships. For example, driverless cars need to know the traffic rules in conditions the real world. The article shows how young scientists and students of the department "Information Processing and Control Systems" of the Bauman Moscow State Technical University successfully create production knowledge bases for the mivar decision-making systems of unmanned vehicles and robotic systems. The paper proposes to actively use our experience in all educational and scientific institutions, which solve the problem of controlling vehicles and robots.

Key words: mivar, mivar nets, artificial intelligence, autonomous road vehicles, decision making system, Wi!Mi, robotic systems, cyber-physical systems.

Аннотация. Важным элементом управления машинами и роботами является система принятия решений на основе продукционных правил и причинно-следственных связей. Например, беспилотные автомобили должны знать правила дорожного движения в реальной обстановке. Показано, как молодые ученые и студенты кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана успешно создают продукционные базы знаний для миварных систем принятия решений беспилотных автомобилей и робототехнических комплексов. Предложено активно использовать наш опыт во всех учебных и научных заведениях, где решают задачи управления машинами и роботами.

Ключевые слова: мивар, миварные сети, искусственный интеллект, беспилотные автомобили, системы принятия решений, КЭСМИ, робототехнические системы, киберфизические системы.

Как известно, в России в области искусственного интеллекта (ИИ) были предложены новые миварные технологии обработки информации: эволюционного накопления и быстрого логического вывода (и автоматического конструирования алгоритмов), что позволило снять ограничение NP-полноты логического вывода за счет кардинального снижения его вычислительной сложности до линейной [1, 2]. В 2017 году был получен патент на миварный способ логического вывода [3]. В настоящее время, наши исследования продолжаются в НИИ МИВАР и на кафедре ИУ-5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Уже несколько лет мы обучаем студентов работе с программным комплексом «КЭСМИ Wi!Mi (РАЗУМАТОР)» (входит в Реестр Российского программного обеспечения Минкомсвязи России), который на обычном ноутбуке способен обрабатывать более 5 млн правил/с. Отметим, что этот программный комплекс учебным и научным заведениям для научной и преподавательской деятельности предоставляется бесплатно.

Важно подчеркнуть, что миварные технологии успешно применяются на логическом уровне исследований в ИИ во всех основных направлениях [4] для разработки

интеллектуальных систем, АСУ [5], систем поддержки принятия решений [6], управления мобильными роботами [7] и беспилотными автомобилями [8], а также для анализа дорожно-транспортных происшествий [9], имитационного и экспертного моделирования [10]. В 2018 году была предложена новая метрика автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов (РТК) и киберфизических систем (КФС) [11], основанная на измерении количества продукционных правил и действий РТК и КФС в возможных ситуациях: чем больше возможностей элементарных действий РТК, тем сложнее может быть его поведение. А в целом количество комбинаций различных ситуаций определяется факториалом от количества элементарных правил-действий. Для управления мобильными роботами и автомобилями разработаны: миварные системы контроля за соблюдением правил дорожного движения на основе "РАЗУМАТОРОВ" и экспертных систем [12]. С 2018 года миварные технологии начали использоваться для интеллектуального планирования поведения роботов в пространстве состояний [13] и предложен новый алгоритм МИПРА, заменяющий STRIPS-планирование [14]. Важно отметить, что для общения роботов и машин на естественном языке с людьми и между собой может быть использован миварный виртуальный русскоязычный текстовый консультант [15]. Подчеркнем, что на английском языке также начаты публикации по тематике миварных технологий [16] для беспилотных автомобилей [17], анализа и реконструкции ДТП [18] и управления дорожным движением [19].

Системы принятия решений для управления машинами и роботами

В настоящее время активно развиваются исследования в области управления машинами и роботами, например, для беспилотного транспорта. Системы технического зрения успешно создаются на основе рефлексного уровня исследований в области ИИ путем активного использования нейросетевых технологий. Однако, для принятия решений в сложных и нестандартных ситуациях необходимо применять логический уровень, где в последнее время успешно используются миварные технологии создания экспертных систем. Важно отметить, что причинно-следственные зависимости в виде продукционных правил в формализме "Если - То" позволяют формализовать, например, правила дорожного движения (ПДД).

В рамках научно-исследовательской работы студентов (НИРС) на кафедре ИУ-5 применяются миварные системы принятия решений (СПР) для беспилотных автомобилей и автономных робототехнических комплексов (РТК). В 2018-2019 годах наши студенты исследовали область создания СПР для обучения правилам дорожного движения беспилотных автомобилей.

Было принято решение разделить ПДД на несколько разделов и одновременно создавать все необходимые базы знаний. Из наших студентов и молодых ученых был выбран и назначен руководитель проекта, который координировал работы и определял форматы представления знаний. Было выявлено, что еще до внесения правил в программном комплексе КЭСМИ необходимо создать миварные таблицы для быстрого, "дружественного" и удобного создания миварных баз знаний по ПДД. Такие таблицы позволяют проверять и верифицировать на противоречивость и достаточность исходных данных.

Приведем пример части миварной таблицы для раздела № 15 пункта № 1 (редакция от 1 января 2019 года). Правило формулируется следующим образом: «Водители транспортных средств могут пересекать железнодорожные пути только по железнодорожным переездам, уступая дорогу поезду (локомотиву, дрезине)». Данное правило прошло предварительную формализацию с учетом ранее выявленных параметров предметной области, результат которой представлен в табл. 1.

Табл. 1. Пример представление правила ПДД в виде миварной таблицы

Подправило	Формальное описание			
	ЕСЛИ		, ТО	
	Параметр	Значение	Параметр	Значение
15.1.1 Наличие железнодорожного переезда	Приближается поезд (дрезина и т.п.)	ИСТИНА	Пересечение ж/д путей запрещено	ИСТИНА
	Стоит поезд (дрезина и т.п.)	ИСТИНА	Пересечение ж/д путей запрещено	ИСТИНА
	Поезд отсутствует (дрезина и т.п.)	ИСТИНА	Пересечение ж/д путей разрешено	ИСТИНА
15.1.2 Отсутствие железнодорожного переезда	Приближается поезд (дрезина и т.п.)	ИСТИНА	Пересечение ж/д путей запрещено	ИСТИНА
	Стоит поезд (дрезина и т.п.)	ИСТИНА	Пересечение ж/д путей запрещено	ИСТИНА
	Поезд отсутствует (дрезина и т.п.)	ИСТИНА	Пересечение ж/д путей запрещено	ИСТИНА

По завершению НИРС были разработаны методики формирования миварных моделей знаний и получен материал для создания миварных баз знаний. Кроме того, в настоящее время разрабатывается технология "сборки" различных баз знаний в общую систему знаний по ПДД. Созданные миварные сети исследуются на макетах, как виртуальных, так и физических.

Выводы

Таким образом, можно утверждать, что отдельные системы Искусственного интеллекта уже созданы и когнитологи (миварные аналитики) активно обучают его разным предметным областям. Создается новая и очень перспективная профессия будущего: "миварный когнитолог", который занимается созданием баз знаний в формализме миварных сетей для управления машинами и роботами. В дополнение к существующим системам управления для беспилотных автономных автомобилей можно применять миварные системы принятия решений, которые способны обеспечить знание роботами правил дорожного движения на логическом уровне принятия решений. Студенты кафедры ИУ-5 МГТУ им. Н.Э. Баумана уже несколько лет успешно осваивают программный комплекс КЭСМИ Wi!Mi и с энтузиазмом создают базы знаний по правилам дорожного движения и другие, предназначенные для управления машинами и роботами. Предлагаем использовать наш опыт обучения и работы по созданию миварных баз знаний для управления машинами и роботами в учебных и научных заведениях.

Литература

1. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. - М.: Радио и связь, 2002. - 288 с. ISBN 5-256-01650-4.
2. Варламов О.О. Системный анализ и синтез моделей данных и методы обработки информации в самоорганизующихся комплексах оперативной диагностики // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Москва, 2003. – 307 с.
3. Варламов О.О., Хадиев А.М., Чибирова М.О., Сергушин Г.С., Антонов П.Д. Автоматизированное построение маршрута логического вывода в миварной базе знаний // Патент на изобретение RUS 2607995 11.02.2015., опубликовано 11.01.2017, бюл. №2.–43 с.
4. Варламов О. О. Миварный подход как основа качественного перехода на новый уровень в области искусственного интеллекта // Радиопромышленность. 2017.№4.С.13–25.
5. Ostroukh, A., Surkova, N., Varlamov, O., Chernenky, V., Baldin, A. Automated process control system of mobile crushing and screening plant // Journal of Applied Engineering Science, 2018, 16(3), 343-348. DOI:10.5937/jaes16-15586
6. Varlamov, O.O. Wi!Mi Expert System Shell as the Novel Tool for Building Knowledge-

Based Systems with Linear Computational Complexity // International Review of Automatic Control, 2018, 11(6), 314-325. DOI: 10.15866/ireaco.v11i6.15855.

7. Варламов О.О. Системы обработки информации и взаимодействие групп мобильных роботов на основе миварного информационного пространства // Искусственный интеллект. 2004. № 4. С. 695—700.

8. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence // Journal of Advanced Transportation. – 2017. – Vol. 2017. – 10 p. DOI: 10.1155/2017/2492765.

9. Чувилов Д.А. Об экспертной системе «Анализ ДТП», основанной на концепции миварного подхода // Проблемы искусственного интеллекта. 2017. № 2 (5). С. 78-88.

10. Чувилов Д.А. Применение экспертного моделирования в получении новых знаний человеком // Радиопромышленность. – 2017. – № 2. – С. 72-80.

11. Варламов О.О. О метрике автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов и киберфизических систем // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 74-86.

12. Варламов О.О., Аладин Д.В. О создании миварных систем контроля за соблюдением правил дорожного движения на основе "РАЗУМАТОРОВ" и экспертных систем // Радиопромышленность. 2018. № 2. С. 25-35. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-2-25-35.

13. Варламов О.О., Аладин Д.В. О применении миварных сетей для интеллектуального планирования поведения роботов в пространстве состояний // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2 (86). С. 75-82.

14. Варламов О.О., Аладин Д.В. Успешное применение миварных экспертных систем для MIPRA - решения задач планирования действий робототехнических комплексов в реальном времени. Радиопромышленность. 2019. № 29(3). С. 15-25. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-15-25.

15. Адамова Л.Е., Варламов О.О., Осипов В.Г., Чувилов Д.А. О практической реализации миварного виртуального русскоязычного текстового консультанта в банковской сфере // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2 (86). С. 10-17.

16. O. O. Varlamov, Exhaustive elementary-incremental summing up of numbers with linear computational complexity. Avtomatizatsiya i Sovremennye Tekhnologii. 1, 34-41 (2003).

17. O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov, D. V. Aladin, L. E. Adamova, V. G. Osipov, Logical artificial intelligence Mivar technologies for autonomous road vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 534(1), 012015 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012015.

18. D. A. Chuvikov, O. O. Varlamov, D. V. Aladin, V. M. Chernenkiy, A. V. Baldin, Mivar models of reconstruction and expertise of emergency events of road accidents. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 534(1), 012007 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012007.

19. D. V. Aladin, O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov, V. M. Chernenkiy, E. A. Smelkova, A. V. Baldin, Logic-based artificial intelligence in systems for monitoring the enforcing traffic regulations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 534(1), 012025 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012025.

**УПРАВЛЕНИЕ МАШИНАМИ И РОБОТАМИ: СОЗДАНИЕ СИСТЕМ
ПЛАНИРОВАНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ (МИПРА)**
*CONTROL OF VEHICLES AND ROBOTS: CREATING OF PLANNING
SYSTEMS IN THE STATE-SPACE (MIPRA)*

Аладин Д.В.^{1,2} – студент, **Варламов О.О.**^{1,2} – д-р. техн. наук, профессор, **Чувилов Д.А.**² – канд. техн. наук, **Адамова Л.Е.**³ – канд. психол. наук, доцент, **Федосеев Д.А.**^{1,2} – аспирант

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени

Н.Э. Баумана»

²НИИ МИВАР

³АНО ВО «Российский новый университет»

aladin.dv@yandex.ru

Abstract. The use of the mivar expert systems allows to solve a new class of problems of automatic planning of robot actions in the state-space, which was previously called STRIPS-planning. The results of the study of the Mivar-based intelligent planner of robot actions (MIPRA) made it possible to prepare justify the application of the mivar technologies with significant reduction of computational complexity of solving the planning problems of robot actions, their groupings, multi-level heterogeneous robotic systems and cyber-physical systems a variety of deployment and destination, which is an important topic in the control of vehicles and robots. Moreover, the solving of planning problems makes it possible to develop driver assistance systems faster and move to the creation of a fully autonomous smart vehicle.

Key words: mivar, mivar networks, decision support system, expert systems, autonomous wheeled vehicles, logical artificial intelligence, driver assistance system, MIPRA, STRIPS, GPS, blocks-world.

Аннотация. Применение миварных экспертных систем позволяет решать новый класс задач по автоматическому планированию действий роботов в пространстве состояний, которое ранее называли STRIPS-планирование. Результаты исследования миварной системы планирования действий роботов и роботизированных средств (МИПРА) позволили подготовить обоснования применения миварных технологий с существенным снижением вычислительной сложности решения задач планирования деятельности роботов, их группировок, многоуровневых разнородных робототехнических комплексов и киберфизических систем различного базирования и назначения, что является важным разделом в управлении машинами и роботами. Более того, решение задач планирования дает возможность быстрее развивать системы помощи водителю и перейти к созданию полностью автономного умного автомобиля.

Ключевые слова: мивар, миварные сети, система принятия решений, экспертные системы, беспилотные автомобили, логический искусственный интеллект, системы помощи водителям, МИПРА, STRIPS, GPS, Blocks World.

Для управления машинами и роботами необходимо решать задачи планирования в пространстве состояний. Представляется важным исследовать на новом уровне задачи, которые относятся к классу STRIPS-планирования [1] в модифицированном классическом домене Blocks World (мир кубиков) [2]. Важность решения в реальном времени задач интеллектуального планирования только возрастает, благодаря открытию новых методов и инструментов для обучения свёрточных [2] и рекуррентных нейронных сетей [3], применения моделей знакового мира [4] в качестве основы для приобретения и поддержания знаний для будущего использования в планировании поведения [5].

Нами предложен новый подход по применению миварных экспертных систем [6] с линейной вычислительной сложностью логического вывода [7] для решения задачи планирования в пространстве состояний. Ранее миварный подход и программный продукт

"РАЗУМАТОР", на котором основан КЭСМИ Wi!Mi, был успешно применен для АСУ [8] и создания систем принятия решений для умных беспилотных автомобилей [9]. Кроме того, в нашей работе были сделаны архитектурные решения миварной системы контроля (МСК) правил дорожного движения (ПДД) [10], которые помогли быстро решить задачу разработки миварной интеллектуальной системы планирования действий робота и робототехнических транспортных комплексов (РТК), которая сокращенно называется – МИПРА [11] "Mivar-based intelligent planner of robot actions" (MIPRA).

Описание задачи миварного планирования действий РТК

Домен задачи, в котором функционирует МИПРА, детально описан в работах [1, 11]. Задача планирования действий по перестановке кубиков для робототехнических комплексов (РТК), к которым по сути относятся машины и роботы, является модификацией классического домена Blocks World [2]. В этом домене есть только: кубики, стол и робот. Из кубиков создают башни различной высоты, в том числе и высотой в один кубик. Всего по условиям задачи на столе можно расположить максимально М башен. Тогда задача планирования РТК состоит в следующем: надо построить план действий робота для перестроения из исходного состояния башен из кубиков в пространстве в искомое состояние башен. Важное ограничение: робот оснащен только одной рукой-манипулятором для перемещения кубиков и инструментами технического зрения, позволяющими распознавать положение кубиков в пространстве.

Покажем переход от архитектурных решений МСК ПДД [10] к созданию логического интеллектуального планировщика МИПРА [11]. Структурная схема МСК ПДД показана на рис. 1. На вход в систему поступают данные от систем технического зрения, сенсоров автомобиля и навигатора, затем информация проходит обработку под формат параметров миварных моделей. Эти модели создаются заранее экспертами в кооперации с когнитологами - инженерами по знаниям. Подчеркнем, что миварные модели соответствуют разделам правил дорожного движения. Далее полученные параметры сохраняются в рабочей памяти – области памяти, в которой накапливается множество фактов, описывающих текущее состояние предметной области, которое представляет собой описание дорожной ситуации. Для решения задачи составления рекомендаций по управлению транспортным средством (или контроля соблюдения правил) передам в систему описание текущей дорожной ситуации, а РАЗУМАТОР выполняет автоматическое конструирование (построение) алгоритма совершения маневра. Затем каждый шаг помещается в стек действий и полученный набор отправляется в систему информирования водителя, тем самым завершая обработку задачи.



Рис. 1. Архитектура МСК ПДД

Для решения задачи контроля ПДД, когда от системы требуется произвести оценку

действий водителя, на вход системы вместе с характеристиками дорожной ситуации подается информация о совершенном маневре. В КЭСМИ «РАЗУМАТОРе» происходит конструирование алгоритма из набора требуемых от водителя действий и полученный набор действий (алгоритм) сравнивается действиями, которые совершил водитель, а полученные результат выдается в систему информирования водителя. Совершенно понятно, что результат оценки действий водителя может передаваться хозяину машины, страховой компании, диспетчеру в случае работы по перевозке грузов или людей или сразу в ГИБДД для принятия мер по наказанию нарушителей.

Описанная МСК ПДД была опубликована в начале 2018 года [10], а в начале работ по планированию действий машин и роботов было выявлено, что эти архитектурные решения могут успешно применяться в разработке МИПРА [11]. Рассмотрим архитектуру МИПРА, которая показана на рис. 2. Как видно из рисунков 1 и 2, в архитектурах МИПРА и МСК ПДД есть отличия, которые определяются информационными потоками. В систему МИПРА поступает задача планирования и по ней генерируется (в некоторых случаях - автоматически) миварная сеть описания предметной области задачи. Алгоритм генерации моделей предназначен для декомпозиции задачи планирования на подцели. Последовательное достижение подцелей приводит к решению задачи. План шага представляет собой набор действий, выполняя которые последовательно можно приблизиться к достижению промежуточной цели. После выполнения шага в МИПРА анализируется информация о текущем состоянии и строится новый план действий шага, который выдается на исполнение роботу. Далее в уменьшающемся цикле «загрузка текущей ситуации → генерация плана выполнения шага» достигаются все промежуточные цели и, следовательно, находится решение задачи перестановки кубиков в башнях.



Рис. 2. Архитектура МИПРА

Важно подчеркнуть, что все практические эксперименты [11] показали, что вместо многих часов и мощных многопроцессорных серверов миварный планировщик на обычном компьютере решает задачи по перестановке даже 300 кубиков менее чем за 90 секунд. При этом МИПРА создает автоматически миварную модель с 3311 параметрами и 1200 правилами, что при других подходов требует полного перебора и вычислительная сложность будет составлять $1200!$ (факториал) и потребует для решения миллиарды лет. Теоретический базис, испытательный стенд и практические результаты, полученные в разработке МИПРА, были применены в дальнейшей реализации МСК ПДД. Полученные нами теоретические результаты позволяют реализовать на практике проект [12], который условно называют: «умные автомобили на умных дорогах и в умном городе» [13].

Выводы

Миварный подход и архитектурные решения, применённые при разработке МСК ПДД, позволили перейти к разработке систем нового класса – логически рассуждающих интеллектуальных планировщиков. Созданный программный продукт МИПРА, основанный на миварном «Разуматоре», качественно снижает вычислительную сложность и во много раз (на порядки) ускоряет время построения алгоритма для решения задач планирования действий робота (STRIPS) по перестановке кубиков в домене Blocks World.

Литература

1. Fikes R., Nilsson N. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving // Artificial Intelligence. – 1971. – N 2. – P. 189-208.
2. Ayunts E., Panov A. I. Task Planning in “Block World” with Deep Reinforcement Learning. In: Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. Springer, 2017, pp. 3–9. DOI: 10.1007/978-3-319-63940-6_1.
3. Svaco M., Jerbic B., Polancec M., Suligoj F. A Reinforcement Learning Based Algorithm for Robot Action Planning. In: Advances in Service and Industrial Robotics, RAAD 2018, Mechanisms and Machine Science, vol 67. Springer, Cham, pp. 493–503.
4. Panov A. I. Behavior planning of intelligent agent with sign world model // Biologically inspired cognitive architectures. – 2017. – Vol. 19. – Pp. 21-31. DOI: 10.1016/j.bica.2016.12.001.
5. Osipov G. S., Panov A. I., Chudova, N. V. Behavior control as a function of consciousness. II. Synthesis of a behavior plan // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2015. – Vol. 54, iss. 6. – Pp. 882-896. DOI: 10.1134/S106423071505010X.
6. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. - М.: Радио и связь, 2002. - 288 с. ISBN 5-256-01650-4.
7. Varlamov O.O. Wi!Mi Expert System Shell as the Novel Tool for Building Knowledge-Based Systems with Linear Computational Complexity // International Review of Automatic Control. 2018. Vol. 11, No. 6. – Pp. 314-325. DOI: 10.15866/ireaco.v11i6.15855.
8. A. Ostroukh, N. Surkova, O. Varlamov, V. Chernenky, A. Baldin, Automated process control system of mobile crushing and screening plant // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – 16(3). – Pp. 343-348. DOI: 10.5937/jaes16-15586.
9. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence // Journal of Advanced Transportation. – 2017. – Vol. 2017. – 10 p. DOI: 10.1155/2017/2492765.
10. D. V. Aladin, O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov, et al. Logic-based artificial intelligence in systems for monitoring the enforcing traffic regulations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 534(1). – 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012025.
11. Варламов О.О., Аладин Д.В. Успешное применение миварных экспертных систем для МИПРА - решения задач планирования действий робототехнических комплексов в реальном времени // Радиопромышленность. – 2019. – № 29(3). – С. 15-25. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-15-25.
12. Varlamov O.O., Chuvikov D.A., Aladin D.V., et al. Logical artificial intelligence Mivar technologies for autonomous road vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 534(1). – 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012015.
13. Chuvikov D.A., Varlamov O.O., Aladin D.V., et al. Mivar models of reconstruction and expertise of emergency events of road accidents // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 534(1). – 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012007.

**ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ БИНАРНОГО ФОРМАТА
КРОССПЛАТФОРМЕННЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ**
*APPROACH TO CROSS-PLATFORM 3D-MODELS BINARY FORMAT
DEVELOPMENT*

Алпатова М.В.¹ – аспирант, ассистент кафедры ИиИТ, **Демидов Д.Г.**¹ – к.т.н., доцент
кафедры ИиИТ, **Винокур А.И.**¹ – д.т.н., директор ИПИТ, **Крупенин В.Л.**² – д.т.н., г.н.с.

¹Московский политехнический университет

²Институт машиноведения РАН

vrisk.serket@gmail.com

Abstract. The article considers the process of analysis, processing and compression of 3D objects for their further transfer to the end user over the network. The question of the necessity to optimize the disk space occupied by 3D models with textures and converting content into a compatible format for any robotic systems is discussed. Comparison of a developed binary format with analogues is resulted.

Keywords: Artificial vision, robotics, 3D content, compression, augmented reality

Аннотация. В статье рассматривается процесс анализа, обработки и сжатия трехмерных объектов. Поднимается вопрос о необходимости оптимизации занимаемого 3D-моделями с текстурами места на диске и преобразовании контента в совместимый формат для любых робототехнических систем. Приводится сравнение разрабатываемого бинарного формата с аналогами.

Ключевые слова: искусственное зрение, робототехника, трехмерные модели, сжатие, дополненная реальность

Введение

В эпоху развития технологий компьютерного зрения и машинного обучения проблема передачи информации в виде трехмерного контента становится всё более актуальной. Еще в 2012 году сама идея устройства Google Glass демонстрировала крайнюю необходимость в разработке инновационных способов потоковой передачи медиаконтента [5]. AR технология не является единственной, где необходимо внедрять новые требования к формату контента.

Применимо к области робототехники нельзя не упомянуть вклад машинного зрения в процессы контроля качества выпускаемой на производстве продукции. Путем 3D-сканирования выпускаемых образцов и их последующего сравнения с эталонной моделью можно выявить брак, а при помощи очков дополненной реальности легко продемонстрировать работникам проблемные участки, требующие исправления [3].

Постановка задачи

Для создания ML модели для распознавания объектов компьютером разработчику может быть необходимо использовать особенный набор данных и параметров, описывающих свойства изучаемого объекта. Такую дополнительную информацию невозможно включить в сторонние форматы, которые не были для нее разработаны.

Выходом из данной ситуации является создание собственного бинарного формата 3D моделей, хранящего в себе информацию, как и о геометрии объекта, так и обо всех картах текстур, а также необходимой дополнительной информации об объекте. Применение алгоритмов сжатия без потерь позволит упаковать наши данные о геометрии вместе с изображениями с наименьшими затратами по занимаемому дисковому пространству выходным файлом.

Этапы подготовки бинарной модели

Первым этапом разработчик 3D-объектов подготавливает трехмерный объект в формате DAE [4] и выкладывает его на сервер вместе с архивом из карт текстур. С этого момента начинается процесс автоматизации, который заключается в обработке

информации о модели и преобразовании ее в наиболее оптимальный формат.

Вторым этапом создается не сжатый бинарный файл, содержащий в себе данные о геометрии модели и картах текстур.

Заключительным этапом производится сжатие модели. Для уменьшения размеров передаваемого объекта можно применять различные методы сжатия, однако для гарантии успешной распаковки файла на конечном устройстве необходимо использовать популярные алгоритмы сжатия. Одним из таких алгоритмов является DEFLATE, являющийся комбинацией из алгоритма Хаффмана и LZ77, также используемый в повсеместно распространенном формате архивов – GZIP [6].

Проверка эффективности бинарного формата 3D-моделей

Для проверки целесообразности использования описанного метода упаковки трехмерных моделей проведем сравнительный анализ исходного размера файлов с конечным. Для сравнения качества полученного формата (в таблицах и графиках ниже указан под названием BFM – Binary Format Model) возьмем аналогичные бинарные форматы, используемые компаниями Apple (USDZ) [1] и Google (GLB) [2] в браузерных приложениях с дополненной реальностью.

В первую очередь сравним степень сжатия геометрии модели без текстур. Для эксперимента было взято 12 моделей формата DAE с общим количеством треугольников в меше от 500 до 300000 единиц. На рис. 1 представлено три графика зависимости размера выходного файла от сложности геометрии исходной модели.



Рис. 1 График зависимости размера конечного файла от сложности геометрии модели

Из рисунка выше можно наблюдать экспоненциальную зависимость размера конечного файла от количества информации о геометрии 3D-моделей, которая свойственна всем трем исследуемым форматам.

Рассмотрим сжатие карт текстур. Возьмем 10 архивов разного объема от 200 до 7000 КБ. В каждом архиве присутствует 4 типа текстур:

- Diffuse (Карта цвета)
- Normal (Карта рельефа)
- Metallic (Карта отражений)
- Roughness (Карта шероховатости)

На рис. 2 демонстрируется разница между исходным размером архива и его сжатым вариантом. Все образцы были отсортированы по возрастанию своего размера на диске (таб. 1).

Таб. 1 Данные о входных и выходных размерах текстур

Номер образца	Размер архива с текстурами, КБ	Размер сжатого архива, КБ
1	200	2793
2	670	1478
3	2480	3321
4	3070	3153
5	3440	1806
6	3530	372
7	6080	1736
8	6530	1900
9	6540	1499
10	6950	1011

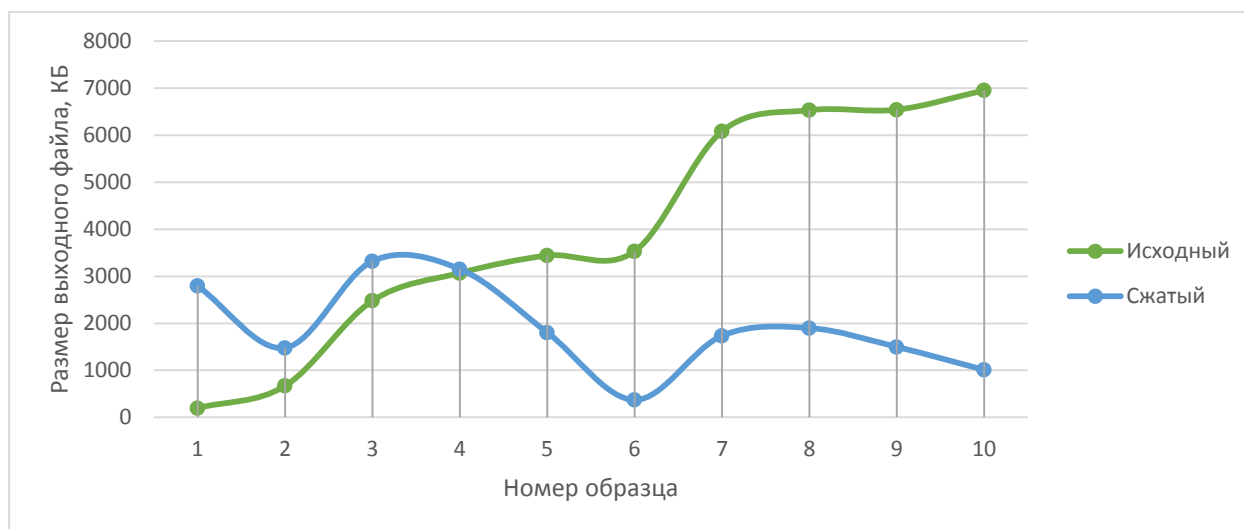


Рис. 2 Данные о входных и выходных размерах текстур

Приведенные данные демонстрируют преимущество сжатия карт текстур объемом свыше 3 МБ, в противном случае информация для кодирования может занимать больше места чем первичный объем данных. В среднем размер архива уменьшился в 2 раза, а максимально в 7 раз по сравнению с исходным.

В таб. 2 указаны все параметры исходных файлов и итоговые размеры бинарного формата моделей, в который включены и геометрия, и карты текстур. На графике ниже (рис. 3) можно заметить, что зависимость размера выходного файла повторяет график функции сжатого образца из рис. 2. Однако у рассматриваемых трех форматов наблюдается различная амплитуда зависимостей. При этом у нашего формата эта амплитуда является наименьшей, а исходный размер стабильно ниже конкурентов.

Таб. 2 Данные о входных и выходных размерах моделей с текстурами

Номер образца	Размер DAE, КБ	Размер текстур, КБ	Общий размер, КБ	Размер USDZ, КБ	Размер GLB, КБ	Размер BFM, КБ
1	65	6540	6605	2502	3203	2793
2	138	3530	3668	1310	1568	1478
3	737	6950	7687	5309	7704	3321
4	1642	6080	7722	4521	10633	3153
5	2100	6530	8630	5107	3461	1806
6	4125	670	4795	3805	2789	372
7	7436	3440	10876	6656	10280	1736
8	8185	3070	11255	5996	13936	1900
9	9567	200	9767	5795	15302	1499

10	12298	2480	14778	6844	8699	1011
----	-------	------	-------	------	------	------

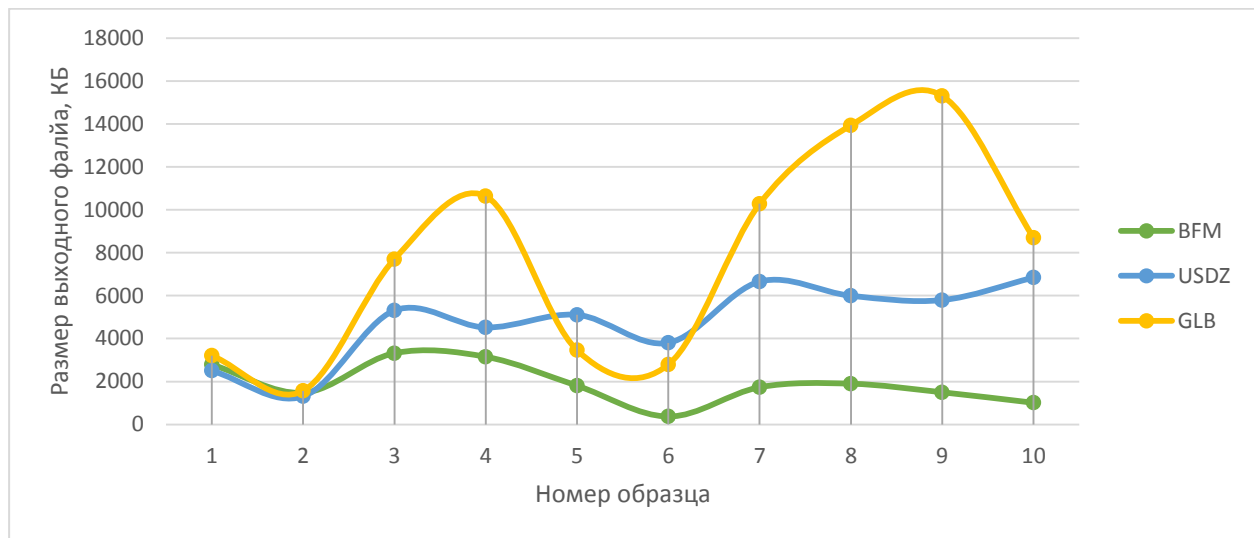


Рис. 3 Графики зависимости размера исходного архива с данными о модели с занимаемым объемом конечного бинарного файла

Из графика выше следует, что разрабатываемый формат BFM в среднем имеет сжатие лучше в 5 раз по сравнению с форматом GLB и в 3,5 раза по сравнению с форматом USDZ.

Заключение

В эпоху активного развития интернет-технологий и онлайн сервисов наиболее остро встает вопрос о сжатии передаваемого контента и безопасности его передачи. Была поставлена задача о разработке такого формата для хранения информации о 3D объекте, которая бы отвечала современным требованиям.

Для решения задачи был разработан алгоритм обработки, сжатия и упаковки данных о геометрии и текстурах трехмерного контента, а затем применен на практике. Сравнительный анализ доказывает эффективность описанного алгоритма и его соответствие требованиям и ожиданиям сегодняшнего дня.

Литература

1. AR Quick Look // Apple Developer URL: <https://developer.apple.com/augmented-reality/quick-look> (дата обращения: 25.09.19).
2. Import and preview 3D assets // ARCore Develop URL: <https://developers.google.com/ar/develop/java/sceneform/import-assets> (дата обращения: 25.09.19).
3. Pietikäinen M.K. Texture Analysis in Machine Vision. - Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2000. - 280 с..
4. Remi Arnaud, Mark C. Barnes COLLADA: Sailing the Gulf of 3D Digital Content Creation. - 1 edition изд. AK Peters, 2006. - 250 с.
5. Jeff Tang Beginning Google Glass Development. - 1 изд. Apress, 2014. - 368 с.
6. Сербин Я. Как работает сжатие GZIP // Habr URL: <https://habr.com/ru/post/221849> (дата обращения: 25.09.19).

РАСЧЕТ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА СДВИГА РОБОТОВ¹.

CALCULATION OF RUBBER-METAL SHOCK ABSORBER OF ROBOTS' SHEAR

Андреева Ю.Ю.¹ -ст. преподаватель, Жуков Б.А.^{1,2} - д.т.н., доц.,

Калинин Я. В.¹ - д.т.н., доц.

¹ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

²«Волгоградский государственный социально-педагогический университет».

ajj308@mail.ru

Abstract. Currently, in the nonlinear theory of elasticity there is no uniform equation of state that is similar to Hooke's law in the linear theory. The development of new elastomeric materials, the study of various biological materials leads to the necessity to create new models of response to external influences. Within hyper elasticity, this leads to the introduction of new mathematical expressions for the strain energy potential. Exact solutions of one model problem with different potentials have been found. The practical significance of exact solutions is not limited to their application for verification of numerical methods; they allow one to study effects that are not described by linear theory.

Key words: finite antiplane deformation, hyperelastic incompressible material, the potential energy of deformation, exact solution.

Аннотация. В нелинейной теории упругости в настоящее время отсутствует единое уравнение состояния, подобное закону Гука в линейной теории. Разработка новых эластомерных материалов, исследование различных биологических материалов приводит к необходимости создания новых моделей отклика на внешние воздействия. В рамках гиперупругости это приводит к появлению новых математических выражений для потенциала энергии деформации. Найдены точные решения одной модельной задачи с разными потенциалами. Практическая значимость точных решений не исчерпывается их применением для верификации численных методов, они позволяют исследовать эффекты, не описываемые линейной теорией.

Ключевые слова: конечная антиплоская деформация, гиперупругий несжимаемый материал, потенциалы энергии деформации, точные решения.

Резинометаллические изделия представляют один важнейших классов изделий, применяемых в современном машиностроении. Поэтому к расчету резиновых изделий предъявляются повышенные требования. В области эксплуатационных нагрузок резина находится в высокоэластичном состоянии, то есть она относится к эластомерам. Поскольку в высокоэластичном состоянии резина является низкомолекулярным материалом и допускает большие эксплуатационные деформации, то для описания напряженно-деформированного состояния необходимо привлекать нелинейную теорию упругости [1]. Решение задач нелинейной теории упругости для резиноподобных материалов осложняется тем, что не известен вид уравнения состояния, описывающий с приемлемой точностью их поведение при любых видах нагружения, подобно закону Гука в линейной теории. На данный момент известно множество моделей, которые хорошо согласуются с экспериментом при одном виде нагружения и плохо при другом для конкретных материалов. В работе [2,3], приведены 32 известные модели гиперупругих изотропных несжимаемых материалов и предлагаются новые. Для верификации предлагаемых конститутивных уравнений эластомеров необходимы точные решения тестовых задач в рамках этих уравнений. Целью работы является нахождение точного решения одной модельной задачи для резинометаллического амортизатора сдвига для потенциала энергии деформации Тамаса-Гента. Такие амортизаторы могут применяться в подвесках и демпфирующих элементах роботов.

Модельная задача о конечном продольном сдвиге круговой цилиндрической втулки между жесткими концентрическими обоймами. В качестве задачи, для которой отыскиваются точные решения, рассматривается задача о конечном продольном сдвиге круговой цилиндрической втулки между жесткими концентрическими обоймами. С одной стороны это одна из простейших задач, с другой стороны она имеет прикладное значение, поскольку это одна из конструкций амортизатора сдвига [4,5]. Внутренняя обойма неподвижна, а внешняя сдвигается вдоль оси симметрии на Δ . Отсчетная и деформированная конфигурации втулки приведены на рисунке 1.

В качестве материальных будем использовать координаты цилиндрической системы координат (r, φ, z) с единичным базисом: $\mathbf{e}_1 = \cos \varphi \mathbf{i} + \sin \varphi \mathbf{j}$, $\mathbf{e}_2 = -\sin \varphi \mathbf{i} + \cos \varphi \mathbf{j}$, $\mathbf{e}_3 = \mathbf{k}$ и осью OZ направленной вдоль оси симметрии втулки. В данном случае антиплоская деформация является и осесимметричной. Выражения, описывающие напряженное состояние однородного изотропного несжимаемого материала с потенциалом энергии деформации, зависящим от первых двух главных инвариантов тензора деформации Коши для этого случая выглядят так (штрих означает производную по r):

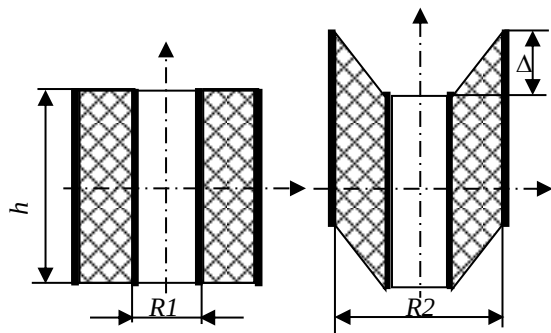


Рисунок 1. Постановка задачи

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} + w(r)\mathbf{k}$$

$$W_1 r = \frac{\partial W}{\partial I_1}, \quad W_2 r = \frac{\partial W}{\partial I_2}$$

$$I_1 = I_2 = 3 + w'^2 r$$

$$\mathbf{S} = 2 \left[p r \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 - W_2 r w'^2 r \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \right] + W_1 r + W_2 r w' r \mathbf{e}_1 \mathbf{k} + \mathbf{k} \mathbf{e}_1 +$$

$$\left[W_1 r w'^2 r + p r \right] \mathbf{k} \mathbf{k}, \quad \begin{cases} p'(r) = \frac{1}{r} \left[r W_2(r) w'^2(r) \right]' \\ \left[r (W_1(r) + W_2(r)) w' \right]' = 0 \end{cases}$$

Здесь $w = w(r)$ - функция деформации поперечного сечения. $p = p r$ - некоторая функция гидростатического давления. Кинематические граничные условия запишутся в форме: $w(R_1) = 0$, $w(R_2) = \Delta$. Подробное решение представлено в [6].

Получено нелинейное дифференциальное уравнение

$$\left[W_1(\rho) + W_2(\rho) \right] \dot{v}(\rho) = \frac{\mu q}{2\rho} \quad (1)$$

Которое используется для нахождения функции деформации поперечного сечения $w r = R_1 v r / R_1$

Выбор моделей изотропного несжимаемого гиперупругого материала. Рассматриваемая задача решалась многими авторами для различных потенциалов.

Остановимся на решении для потенциала Томаса - Гента, для которого нам не удалось найти решения в литературе. Поскольку для однородных материалов первого порядка W_1 и W_2 являются функциями только $\dot{\nu}(\rho)$ и некоторых параметров. То при подстановке конкретного выражения для потенциала энергии деформации в уравнение (1) оно становится алгебраическим или трансцендентным уравнением относительно $\dot{\nu}(\rho)$. Получение точного решения всегда возможно для алгебраических уравнений степени не выше четвертой.

Выражение для потенциала Гента-Томаса имеет вид:

$$W = \mu \left[\frac{3-2\beta}{6} I_1 - 3 + \beta \ln \frac{I_2}{3} \right], \quad 0 \leq \beta < \frac{3}{2}.$$

Выражение приведено в форме, при которой уравнение состояния с этим потенциалом при малых деформациях переходит в закон Гука. Поскольку уравнение имеет вещественные коэффициенты, то в решении получаем два комплексно сопряженных и один вещественный корень [6].

Для значений $0 \leq q < 0.8$, $0 \leq \beta < 3/2$ находим выражение для функции депланации и

выражение для жесткостной кривой амортизатора $\nu \rho = \int_1^\rho \dot{\nu} t dt$, $\delta = \int_1^\kappa \dot{\nu} \rho d\rho$.

При $\beta \rightarrow 0$ потенциал Гента-Томаса стремится к потенциалу Трелоара.

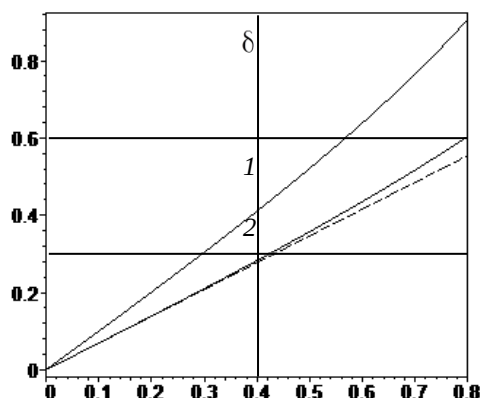


Рисунок 2. Жесткостные кривые амортизатора

На рисунке 2 представлены кривые для $\beta=1.3$ (кривая 1) и $\beta=1.0$ (кривая 2). Штрихованная прямая соответствует потенциалу Трелоара. Построение приводится при $\kappa=2$. Видно, что зависимости нелинейные и приближаются с уменьшением β к зависимости Трелоара сверху, то есть описывают менее жесткие материалы.

Заключение. Получены точные аналитические решения для потенциала энергии деформации Томаса-Гента. В качестве задачи, рассматривалась задача антиплоской осесимметричной деформации цилиндрической втулки между жесткими концентрическими обоймами.

Работа поддержана РФФИ, проект № 19-41-340009

Литература

1. Лурье А. И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.

2. Hossa L., Marczakb R. J. A new constitutive model for rubber-like materials. // Computational Mechanics 29, 2010. P. 2759 - 2773.
3. Черных К.Ф., Шубина И.М. Законы упругости для изотропных несжимаемых материалов, феноменологический подход // Механика эластомеров. Краснодар, 1977. Т. 1. Вып. 242. С. 54–64
4. Жуков Б.А. Нелинейное взаимодействие конечного продольного сдвига и конечного кручения втулки из резиноподобного материала // Изв. РАН МТТ. 2015. № 3. С. 127-135.
5. Horgan C., Saccomandi G. Superposition of generalized plane strain on anti-plane shear deformations in isotropic incompressible hyperelastic materials. //Journal of Elasticity 73, 2003. P. 221–235.
6. Андреева Ю.Ю, Жуков Б.А, Точные аналитические решения одной задачи нелинейной теории упругости для двух потенциалов энергии деформации несжимаемого материала // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2018. – № 2 (46). –С. 64–76.

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИВОДОВ
БИПЛАНЕТАРНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ**
*DESIGN FEATURES OF DRIVES OF PLANETARY MIXERS OF LARGE
VOLUMES*

Г.А.Бондаренко – курсант, **Л.А.Левин** – курсант, **С.Л.Бочков** – к.т.н., доц.
Московского высшего общевойсковое командное орденов Ленина и Октябрьской
Революции Краснознаменное училище
afz_moscow@mail.ru

Abstract. Based on the analysis of design features of adaptive biplanetary mixers, the design differential biplanetary drives for mixers of large volumes are proposed. Attention is paid to the calculations of the kinematic parameters of the stirrers motion, providing the optimal mixing mode.

Key words: adaptive biplanetary mixer, differential device, bevel gear, kinematic parameters.

Аннотация. На основе анализа конструктивных особенностей адаптивных бипланетарных смесителей предложены конструкции дифференциальных бипланетарных приводов для смесителей больших объемов. Уделено внимание расчётам кинематических параметров движения мешалок, обеспечивающих оптимальный режим перемешивания.

Ключевые слова: адаптивный бипланетарный смеситель, дифференциальный механизм, конические зубчатые передачи, кинематические параметры.

В работе [1] рассмотрены аспекты подбора конструктивных и технологических параметров адаптивных бипланетарных смесителей. Отмечены их достоинства: отсутствие застойных зон; равномерность перемешивания; малые диаметры мешалок. Это обеспечивает высокую производительность и гарантированное качество продукции.

Для аппаратов с большим объемом загрузки представляют интерес бипланетарные смесители с приводом мешалок, выполненным по схеме (рис.1). Особенность этих приводов в том, что размеры поводков H и h можно менять за счет изменения длины горизонтальных промежуточных валов привода 5 и 6. Это позволяет увеличивать размеры корпуса смесителя, не меняя существа конструкции элементов привода.

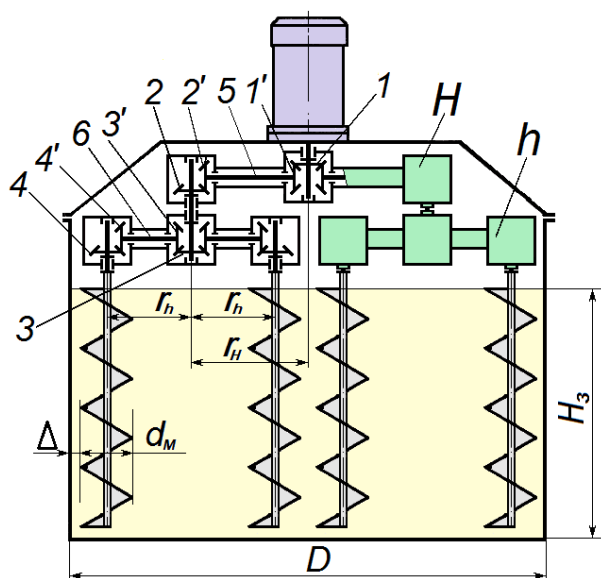


Рис. 1. Схема цилиндрического смесителя

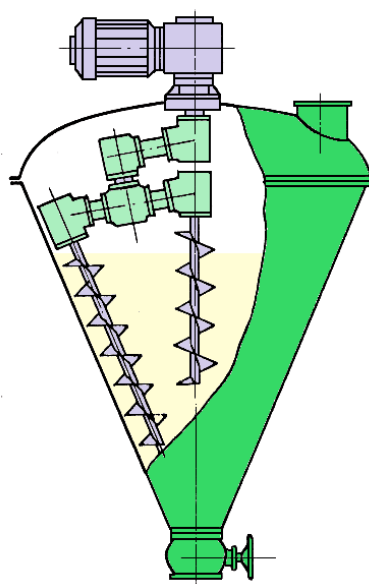


Рис. 2. Схема конического смесителя

При этом использование в конструкции привода конических зубчатых передач позволяет выполнить привод не только с цилиндрическим корпусом аппарата, но и с коническим корпусом. Это является существенным преимуществом, поскольку цилиндрическая форма корпуса, в ряде случаев, не всегда является рациональной. В аппаратах с плоским дном, как правило, затруднена полная выгрузка готового продукта. Для облегчения выгрузки может быть использован конический корпус. В качестве примера на рис.2 представлена схема бипланетарного смесителя с коническим корпусом.

Методика расчета геометрических размеров аппарата, нагрузок на мешалки в процессе работы, установленной мощности привода представлена в работе [1].

Некоторую особенность определения кинематических параметров движения мешалок: частоты ω_m и скорости v_{cp} , представляет определение знака передаточного отношения конических зубчатых передач планетарной $u_{1,2}^H$ и бипланетарной $u_{3,4}^h$ ступеней в обратном движении рассчитываемых по формулам [1]:

$$\omega_m = \omega_1 u_{1,2}^H u_{3,4}^h \lambda_M^2 C_P C_M^{-1} A^{-1}, \quad v_{cp} = \frac{\omega_1 u_{1,2}^H (1 - u_{3,4}^h) r_h}{A \lambda^2},$$

где $u_{1,2}^H = (\mp) \frac{z_2 z_1'}{z_1 z_2'}$; $u_{3,4}^h = (\mp) \frac{z_4 z_3'}{z_3 z_4'}$ – передаточные отношения в обратном движении (знак + или – зависит от положения зацепления пары зубчатых конических колес в приводе); $z_1 \dots z_4$ – числа зубьев соответственно 1...4 конических колес привода (рис.1).

На рис.3 и 4 представлены эскизные проработки конструкций зубчато-рычажных механизмов бипланетарных приводов.

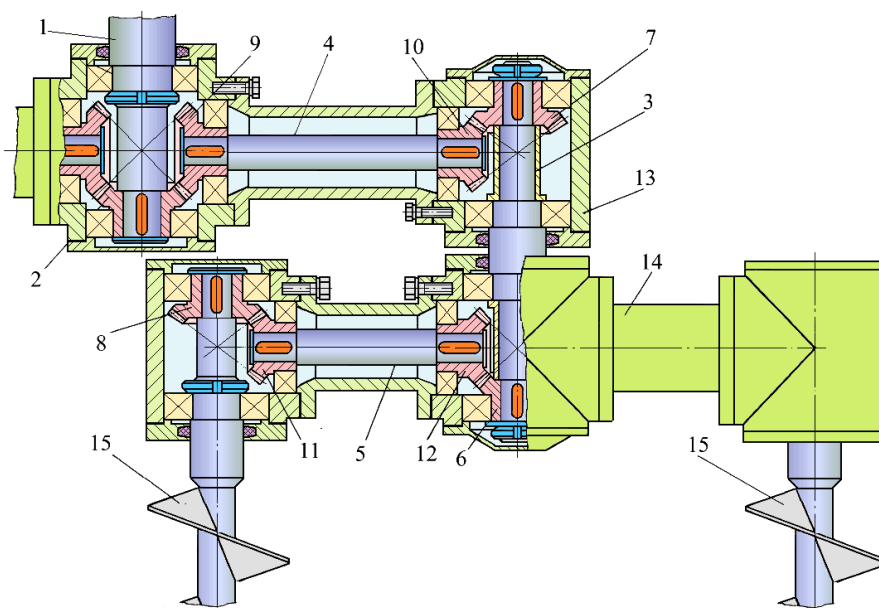


Рис.3. Элементы конструкции привода цилиндрического бипланетарного смесителя:
1 – центральный вал; 2 – центральное колесо; 3 – промежуточный вал; 4, 5 – горизонтальные промежуточные валы; 6 – центральное колесо бипланетарной ступени; 7, 8 – сателлиты планетарной и бипланетарной ступеней; 9, 10 и 11, 12 – промежуточные зубчатые колеса планетарной и бипланетарной ступеней; 13, 14 – поводки планетарной и бипланетарной ступеней; 15 – мешалки

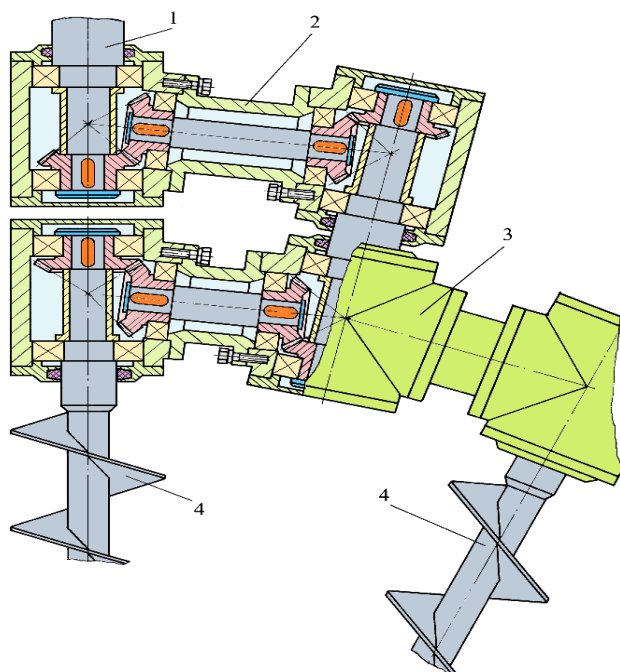


Рис. 4. Элементы конструкции привода конического бипланетарного смесителя.

1 – центральный вал; 2 – планетарный поводок в сборе; 3 – бипланетарный поводок в сборе; 4 – мешалки

Таким образом, рассмотренные зубчато-рычажные механизмы приводов используются в бипланетарных смесителях, как с коническим, так и с цилиндрическим корпусом. Для цилиндрических аппаратов с большим объемом загрузки оптимальной конструкцией привода является вариант, представленный на рис.3. Для облегчения выгрузки сыпучих материалов предпочтительнее использовать конический смеситель с приводом, представленным на рис.4.

Литература

1. Бондаренко Г.А., Левин Л.А., Бочков С.Л. Аспекты подбора конструктивных и технологических параметров адаптивных бипланетарных смесителей. Сборник трудов XXX Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2018), Москва, 20-23 ноября 2018. М: Изд-во ИМАШ РАН, 2019. С.541-544.

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОРНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

PRINCIPLES OF FUNCTIONING OF THE AUTONOMOUS DEVICE FOR WEED CONTROL FOR PRECISION AGRICULTURE

Дышеков А.И.¹ – м.н.с., Смирнов И.Г.¹ – док. тех. наук, ученый секретарь, Мирзаев
М.А.¹ – м.н.с., Шереужев М.А.² – ассистент.

¹ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

⁴МГТУ им. Н.Э. Баумана

a.i.dyshekov@gmail.com

Abstract. The article shows results of creation a system to reduce the negative impact on the ecological situation and biological systems while eliminating weeds in beetroot production. Methods of controlling weeds using machine vision technology are considered. For machine vision algorithms has been prepared a library of images. An algorithm and technical device have been developed for cultivating the soil in the early stages of beet growth.

Key words: weed control, key words, image processing for agriculture, image segmentation, robotic platform, computer vision for agriculture.

Аннотация. Работа посвящена созданию системы для снижения отрицательного влияния на экологическую обстановку и биологические системы при устранении сорной растительности на свекольном производстве. Рассмотрены методы контроля сорной растительности с помощью технологии машинного зрения. Подготовлена библиотека изображений культуры, используемая алгоритмами машинного зрения. Разработаны алгоритм и техническое устройство для обработки почвы на ранних стадиях роста свеклы.

Ключевые слова: сорная растительность, роботизированная платформа, машинное зрение, сегментации изображений, морфологическая обработка изображений.

Последние десятилетия чрезмерная зависимость от гербицидов при производстве свеклы вызвала серьезные экологические и биологические проблемы на территориях, прилегающих к угодьям и самим участкам, где производится возращивание культуры, такие как загрязнение почвы и подземных вод, а также появление устойчивых к гербицидам сорных растений. Потенциальным решением для сокращения использования гербицидов при сохранении контроля нежелательной растительности является совместное использование химической и механической обработки. Точное обнаружение сорняков является необходимым условием для реализации данной стратегии контроля сорной растительности. В настоящем исследовании была разработана система машинного зрения для распознавания сорной растительности, использующая методы контурной и цветовой идентификации объекта на изображении. В систему включен алгоритм сегментации исследуемого объекта, с помощью библиотеки OpenCV (Phyton) для бинаризации изображений сорной растительности с целью последующей обработки и процедур извлечения признаков объекта. Впоследствии будет создан классификатор на основе машины поддержки (МП) для идентификации различных видов сорной растительности с использованием морфологических признаков [1;2].

Ключевым требованием для контроля сорных растений является точное обнаружение положения в пространстве и идентификация сорняков. При этом процессы обнаружения и удаления должны быть синхронизированы с перемещением в пространстве несущего транспортного средства, которое выполняет функции обеспечения мобильности роботизированного устройства контроля роста сорняков. Данное требование определяет минимальные значения параметров быстродействия и точности системы.

Принцип работы устройства для контроля сорной растительности с учетом процесса распознавания сорной растительности с использованием компьютерного зрения можно формализовать в виде блок-схемы, показанной на рисунке 1 процесса [3].

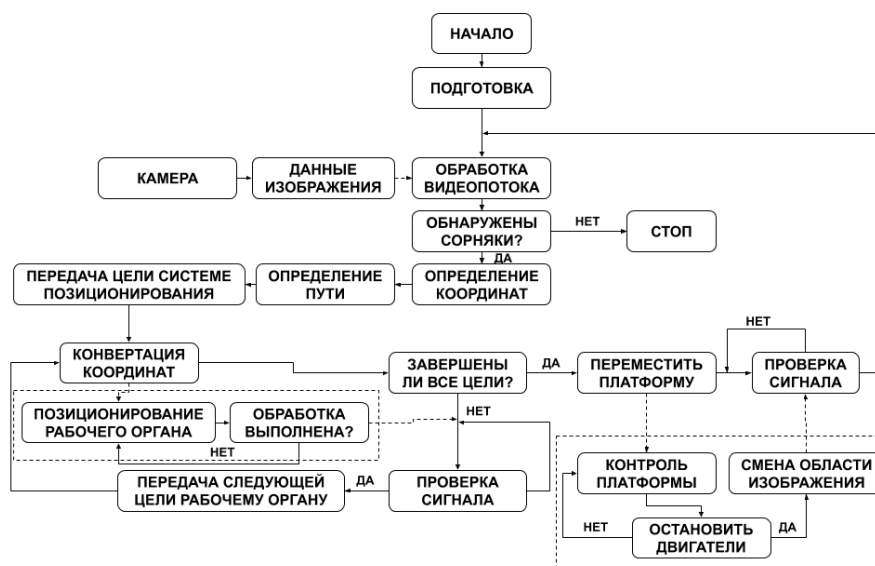


Рис. 1. Блок-схема процесса распознавания сорной растительности

Установка оснащается сенсорными системами, которые позволяют автономно идентифицировать требуемые объекты. После обнаружения сорной растительности проводится механическая обработка, с последующим введением небольшого количества гербицида в корневую систему сорняка. Такой подход обеспечивает снижение стоимости использования гербицида за счет уменьшения количества при точечном введении и снижает экологическую нагрузку на окружающую среду, что является преимуществом по сравнению с общим распылением гербицидов. Дополнительный экологический эффект может быть достигнут при использовании легковесных мобильных шасси, вместо полноразмерных тракторов, в связи с меньшим уплотнением почвы за счет меньшего веса сельскохозяйственной техники.

Обнаружение сорной растительности выполняется с помощью технического зрения, ниже будет приведено описание данного метода применительно к задаче распознавания типа растительности. Основным недостатком этого метода являются зависимость от изменения степени освещенности. Причиной нестабильного освещения может послужить облачность, изменение относительного положения Солнца, наличие теней, бросааемых габаритной сельскохозяйственной техникой, так как ввиду действия данных факторов уменьшается количество света, падающего на обрабатываемую почву и вследствие этого качество получаемого изображения. Наиболее серьезным потенциальным препятствием, связанным с изменением уровня света, является низкая степень обработки изображения, что может быть сведено к минимуму за счет использования автоматической регулировки скорости затвора или автоматическая подстройка диафрагмы к условиям внешней среды [4]. Кроме того, изменение уровня освещенности и затенение может привести к низкой эффективности или непригодности традиционных методов обработки для сегментации изображения с целью идентификации сорной растительности [5]. Наиболее распространённое решение - применение методов машинного обучения для сегментации изображений и выделения сорняков [6].



Рис. 2. Образцы почвы для проведения исследования: а) образец с высокой плотностью сорной растительности; б) образец с средней плотностью сорной растительности

Для определения типа растения необходимо предварительно определить границы растения и фона [7]. С этой целью пикселям, которые отображают области растения, придаются высокие значения индексам RGB, в то время как фону – низкое. Элементы растений характеризуются значениями выше порогового ζ , при вычитании ExR из ExG .

Здесь $ExR = (2r - g - b)$, избыток красного цвета, а $ExG = (2g - r - b)$ – зеленого.

Где $r = R^*/(R^*+G^*+B^*)$, $g = G^*/(R^*+G^*+B^*)$, и $b = B^*/(R^*+G^*+B^*)$, - хроматические координаты, а R^*, G^* и B^* - нормированные значения RGB (0-1) [8]. где ζ рассчитывается по методу Оцу [9]. Принцип иллюстрируется на рисунке 3.

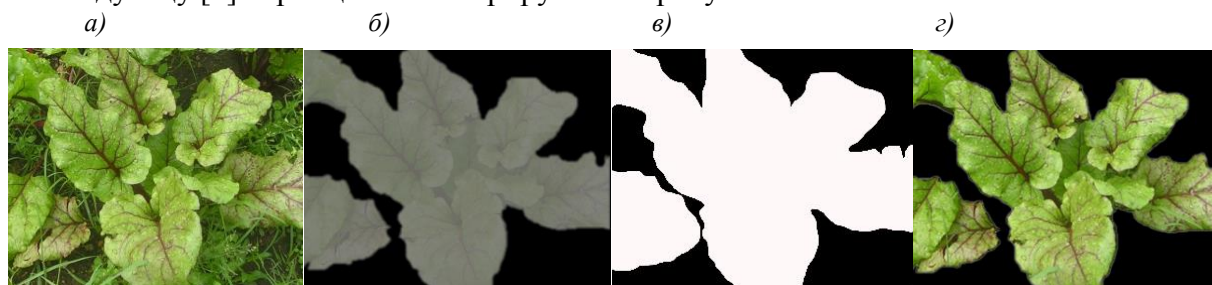


Рис. 3. Вычленение растений с использованием метода $ExG - ExR$: (а) оригинальное изображение; (б) выделение растительности методом вычитания; (в) определение контура растения (г) растение без гравийного фона

В первую очередь необходимо обеспечить покрытие зоны идентификации системой технического зрения. Для обеспечения покрытия зоны идентификации возможно прибегнуть к следующим решениям: использование несколько взаимно юстированных камер; использование одной камеры, расположенной на подвижном основании. Ниже представлен вариант реализации метода с подвижным основанием.

Конструкция слайдера для фото- и видеосъемки имеет каретку с четырьмя роликами и платформу для крепления камеры. В качестве направляющих использую стальной профиль диаметром 20 мм. и длиной 1 м.

Управление осуществляется четырьмя шаговыми двигателями. Концевыми датчиками, микроконтроллерами и компьютером. Платформа может варьироваться по размеру от площади посадки от 1 м² до 4,5 м². С дополнительными аппаратными средствами и модификациями в дальнейшем ожидается масштабирование примерно до 50 м².

На рисунках ниже показана рабочая установка, разработанная на базе Федерального Научного Агроинженерного Центра ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.



а) б)
 Рис. 4. Разработанный в ходе исследовательской работы автономный роботизированный комплекс контроля сорной растительности: а) полная установка; б) рабочий узел в момент обработки растительности

Разработан метод, алгоритм и техническое устройство для идентификации и уничтожения сорняков на ранних стадиях роста свеклы. Предлагаемый метод устойчив к освещению из-за условий окружающей среды. Разработан прототип каретки для расположения камеры и ее позиционирования. Алгоритм может быть использован для исследования и распознавания с помощью технологии машинного зрения культурных растений и сорняков.

Литература

1. Aitkenhead, M. Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods / M. Aitkenhead, I. Dalgetty, C. Mullins, A. McDonald and N. Strachan // Computers and electronics in Agriculture. — № 39(3). — 157-171 p.
2. Burks, T. Backpropagation neural network design and evaluation for classifying weed species using color image texture / T. Burks, S. Shearer, R. Gates, K. Donohue // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. — № 43(4). — 1029-1037 p.
3. Wang, X.-F. Classification of plant leaf images with complicated background / X.-F. Wang, D. Huang, J. Du, H. Xu, L. Heutte // Applied Mathematics and Computation. — 2008. — 916-926 p.
4. Hall, D. Evaluation of features for leaf classification in challenging conditions / D. Hall, C. McCool, F. Dayoub, N. Sunderhauf, B. Upcroft // IEEE Winter Conference. — 2015. — 797-804 p.
5. Gerruti, G. A model-based approach for compound leaves understanding and identification / G. Gerutti, L. Tougne, J. Mille, A. Vacant, D. Coquin / In IEEE Intl. Conf. on Image Processing. — 1471-1475 p.
6. Hemming, J. Computer-vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting / J. Hemming, T. Rath. // Journal of Agricultural Engineering Research — 2001. — № 78 (3). — 233-243 p.
7. Дышеков, А.И. Разработка алгоритма и технического устройства для распознавания сорняков / А.И. Дышеков, [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. — 2018. — №3 (28). — с.288-294.
8. Meyer G. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging application // G. Meyer, J. Neto // Comput Electron Agric. — 2008. — №63(2). — 282-293 p.
9. Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // IEEE Trans Syst Man Cybernet. — 1979. — №9 (1). — 62-66 p.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОБАЛОК ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕОРИЯМ РАЗМЕРНО-ЗАВИСИМОГО ПОВЕДЕНИЯ¹

COMPARISON OF THE RESULTS OF SOLVING THE PROBLEM OF NANOBLOCK CONTACT INTERACTION ACCORDING TO DIFFERENT THEORIES OF SIZE-DEPENDENT BEHAVIOR

Жигалов М.В., Апрыскин В.А.

Саратовский Государственный Технический Университет имени Гагарина Ю. А.

zhigalovm@yandex.ru

wwoooow@yandex.ru

Abstract: A mathematical model of the package for two nano Bernoulli-Euler beams connected through boundary conditions is constructed. Used gradient theory of deformations and the theory of the account of contact interaction of B. Ya. Kantor. The influence of the length dimension parameters on the modes of beam vibrations is studied.

Keywords: Bernoulli beam, strain gradient theory, contact interaction.

Аннотация: В работе построена математическая модель пакета для двух нано балки Бернулли-Эйлера связанных между собой через граничные условия. Используется градиентная теория деформаций и теория учета контактного взаимодействия Б. Я. Кантора. Проведено исследование влияния размерных параметров длины на режимы колебаний балок.

Ключевые слова: Балка Бернулли, градиентная теория деформации, контактная задача.

Постановка задачи. Основываясь на теории напряжений более высокого порядка Mindlin[1] и Lam et al. [2] построена математическая модель нано балок Бернулли-Эйлера, соединенных через краевые условия, под действием поперечной нагрузки. Для учета размерных эффектов вводятся три параметра шкалы длины материала (l_0, l_1, l_2). Для учета контакта между балками, используется винклера связь между обжатием и контактным давлением между двумя балками [3]:

$$\Psi = \frac{1}{2} \left[1 + \text{sign}(w_1 - \tilde{h} - w_2) \right], \quad (1)$$

где $\Psi = 1$, если $w_1 > w_2 + \tilde{h}$ то есть имеется контакт между балками, иначе $\Psi = 0$.

Математическая модель контактного взаимодействия двух нано балок, на основе кинематической гипотезы Бернулли-Эйлера и градиентной теории упругости, описывается системой разрешающих уравнений:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^4 w_m}{\partial x^4} \left((\lambda + 2\mu) \frac{bh^3}{12} + l_0^2 \mu bh + l_2^2 \mu bh + \frac{96}{225} l_1^2 \mu bh \right) - \\ & - \frac{\partial^6 w_m}{\partial x^6} \left(2l_0^2 \mu \frac{bh^3}{12} + \frac{14}{225} l_1^2 \mu \frac{bh^3}{12} \right) - q_m + (-1)^m K(w_1 - w_2 - \tilde{h})\Psi = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – номер балки ($m=1,2$), $\tilde{h}$ - зазор между балками.

Граничные условия имеют вид:

$$w_m = 0; \quad \frac{\partial w_m}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Начальные условия имеют вид:

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-19-00215

$$w_m(x, 0) = 0; \frac{\partial w_m(x, 0)}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Система (2-4) сводилась к задаче Коши с помощью метода конечных разностей $O(h^2)$. Задача Коши решалась методом Рунге-Кутты 4 порядка. Проведено исследование сходимости по методу конечных разностей, на основании которого выбрано оптимальное количество разбиений. Шаг разбиений для метода Рунге-Кутты определялся по принципу Рунге.

Результаты исследования влияния масштабных коэффициентов длины материала на динамику контактного взаимодействия.

Для рассмотренных задач использовались следующие значения параметров: $\varepsilon = 0.1$, $\tilde{h} = 0.01$, $q_1 = 10\sin(5.3 \cdot t)$, $q_2 = 0$.

Результаты исследований для двух из девяти рассмотренных комбинаций безразмерных параметров шкалы длины материала (l_0, l_1, l_2) показаны на Рис. 1-6. Для первого случая $l_0 = 0, l_1 = 0, l_2 = 0$. Второй случай характеризуется значениями $l_0 = 0.3, l_1 = 0.3, l_2 = 0.3$.

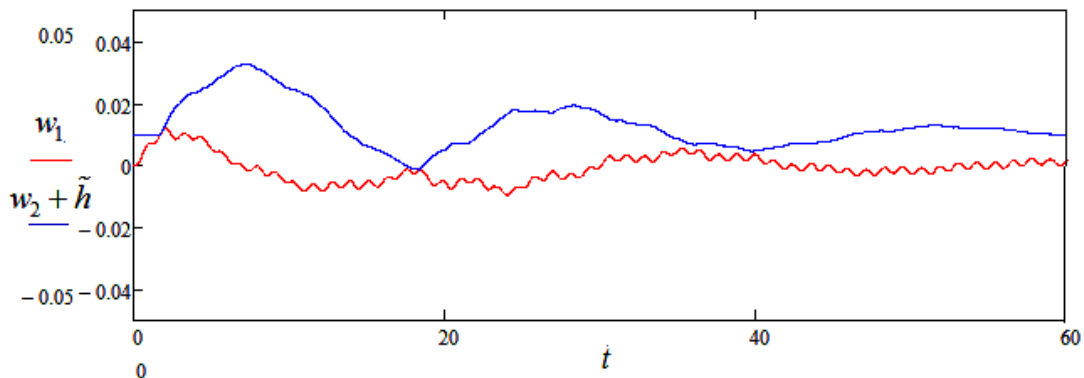


Рис.1. Прогибы первой балки $w_1(0.5, t)$ и второй балки $w_2(0.5, t) + \tilde{h}$ для значений $l_0 = 0, l_1 = 0, l_2 = 0$

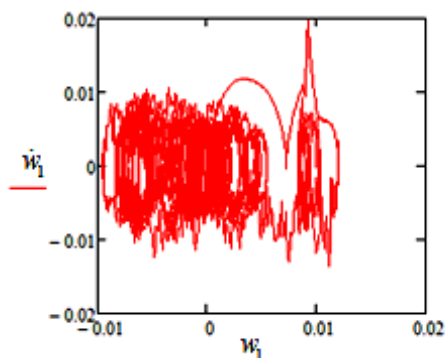


Рис.2. фазовый портрет первой балки $\dot{w}_1[w_1(0.5, t)]$ $l_0 = 0, l_1 = 0, l_2 = 0$

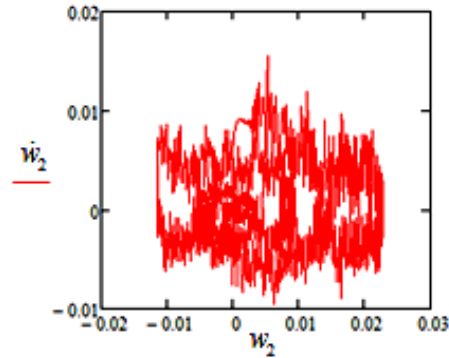


Рис.3. фазовый портрет второй балки $\dot{w}_2[w_2(0.5, t)]$ $l_0 = 0, l_1 = 0, l_2 = 0$

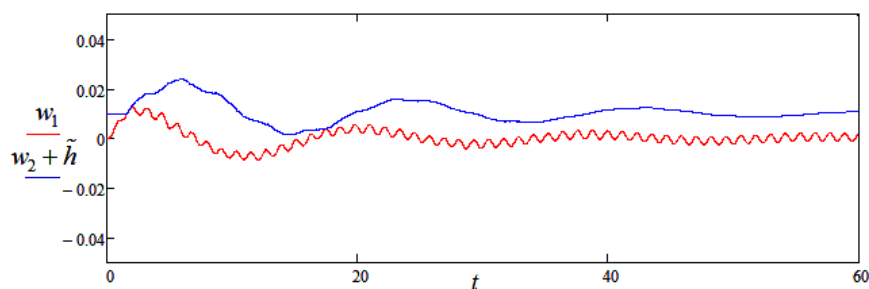


Рис.4. Прогибы первой балки $w_1(0.5,t)$ и второй балки $w_2(0.5,t) + \tilde{h}$ для значений $l_0 = 0.3, l_1 = 0.3, l_2 = 0.3$

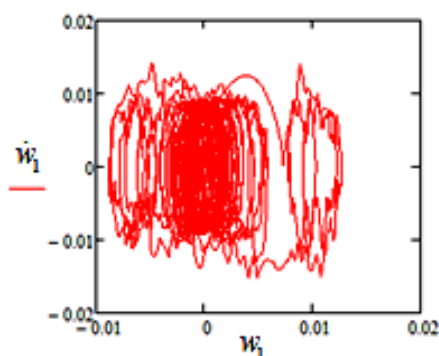


Рис.5. фазовый портрет первой балки
 $\dot{w}_1[w_1(0.5,t)]$ $l_0 = 0.3, l_1 = 0.3, l_2 = 0.3$

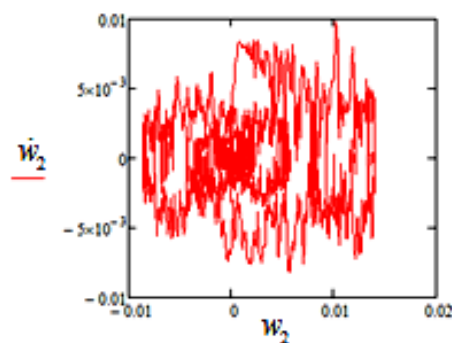


Рис.6. фазовый портрет второй балки
 $\dot{w}_2[w_2(0.5,t)]$ $l_0 = 0.3, l_1 = 0.3, l_2 = 0.3$

Сравнение результатов представленных на Рис. 1-6, показывает, что учет размерных коэффициентов (l_0, l_1, l_2) при исследовании контактного взаимодействия существенно влияет на характеристики динамики балок – сигнал $w(0.5,t)$ и фазовый портрет $\dot{w}[w(0.5,t)]$. За счет учета размерно-зависимых коэффициентов (случай 2) балки «работают» более жестко и после контакта первой и второй балок происходит отскок балки без нагрузки и ее свободных затухающих колебаний.

Выводы. В работе построена математическая модель контактного взаимодействия нано балок Бернулли-Эйлера на основе градиентной теории упругости. Исследовано влияние безразмерных параметров шкалы длины материала на динамику контактного взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-19-00215

Литература

1. Mindlin RD. Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity. Int J Solids Struct. 1965;1:417-38.
2. Yang F, Chong ACM, Lam DCC, Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. Int J Solids Struct. 2002;39:2731-43.
3. Кантор Б.Я. Метод решения контактных задач нелинейной теории оболочек / Б.Я. Кантор, Т.Л. Богатыренко // Докл. АН УССР. сер. А. 1986. №1. С.18-21.

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТОЙ ИЗОГНУТОЙ БАЛКИ ИЗ
УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ЧЕТЫРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ¹**
*RESEARCH OF THE CARBON/EPOXY LAMINATED CURVED BEAMS
STRENGTH IN FOUR-POINT BENDING TEST*

Зубова Е.М. – аспирант, инженер-исследователь, **Лобанов Д.С.** – к.т.н., старший научный сотрудник, **Струнгарь Е.М.** – аспирант, младший научный сотрудник,
Темерова М.С. – аспирант, младший научный сотрудник
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр
экспериментальной механики
e-mail: cem.zubova@mail.ru

Abstract. The experimental study results of the of the carbon/epoxy laminated curved beams strength of samples based on laminated carbon fiber and laminated carbon fiber reinforced in the transverse direction by Tufting firmware with four-point bending are presented. The tests were carried out according to the procedure agreed upon with the international standard ASTM D6415 with using the electromechanical system Instron 5965 and the acoustic emission signal recording system AMSY-6.

Key words: carbon/epoxy, curved beams, four-point bending test, acoustic emission, curved beams strength.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований несущей способности изогнутой балки на основе слоистого углепластика и слоистого углепластика с усилением в поперечном направлении методом прошивки Tufting при четырехточечном изгибе. Испытания проводились по согласованной с международным стандартом ASTM D6415 методике, на электромеханической системе Instron 5965 совместно с системой регистрации сигналов акустической эмиссии AMSY-6

Ключевые слова: углепластик, изогнутая балка, четырехточечный изгиб, акустическая эмиссия, прочность изогнутой балки.

Широкое применение слоистых композитов при производстве ответственных конструкций ведет к необходимости детального изучения процесса межслоевого расслаивания. Важность и актуальность данного направления исследований связана с тем, что современные инженерные конструкции включают в себя различные геометрические изгибы, которые в свою очередь приводят к концентрации напряжений и образованию расслоений. Поэтому отдельное внимание уделяется экспериментальным исследованиям, связанным с изучением механического поведения композита при изгибе [1].

Один из экспериментальных методов определения прочности изогнутой балки при четырехточечном изгибе представлен в рамках ASTM. Данный метод имеет различные преимущества по сравнению с другими существующими методами: напряжение не зависит от углового положения и изгибающий момент в рабочей части образца является постоянным [2]. Во многих современных научных исследованиях для изучения прочности слоистых композитов используют метод акустической эмиссии, который является одним из наиболее распространенных [3-6].

Целью работы было оценка влияния поперечной прошивки на механическое поведение и прочность слоистых углепластиков при четырехточечном изгибе кривой балки.

Исследуемыми материалами были слоистые углепластики на основе углеволокна AKSA F49 12K и эпоксидного связующего T26 состоящие из 12 слоев и из 12 слоев с усилением в поперечном направлении методом прошивки Tufting. Всего испытано 20

¹ Работа поддержана РФФИ, проекты № 18-01-00763 а, № 19-41-590005 р_а, № 18-31-00452 мол_а

образцов, по 10 каждого вида.

На базе Центра коллективного пользования «Центр экспериментальной механики» Пермского Национального исследовательского политехнического университета (ЦКП ЦЭМ ПНИПУ) были проведены серии испытаний образцов изогнутой балки из слоистого углепластика на четырехточечный изгиб. Испытания проводились на электромеханической системе Instron 5965 по ASTM D 6415. Скорость подвижного захвата 2 мм/мин. Нагрузка измерялась динамометрическим датчиком мощностью до 5кН. Точность измерения нагрузки составляет 0,5% от измеряемой величины в диапазоне 0,2%-1% номинальной мощности датчика нагрузки. Образец устанавливали в оснастку для четырехточечного изгиба (рис. 1). Расстояние между центрами нижних и верхних опор 100 мм и 75 мм соответственно, диаметры прижимных валов 9,5 мм. Контроль разрушения образцов проводился методом регистрации сигналов акустической эмиссии.

Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществлялась в течение всего испытания до момента разрушения образца с помощью системы Vallen Amsy-6 (Германия). Использовался один широкополосный датчик AE105A (диапазон частот 450-1150 кГц) и предусилителя АЕР4 с коэффициентом усиления 34 дБ. Датчик крепился к образцам с помощью резинового приспособления, как показано на рисунке 1, б.

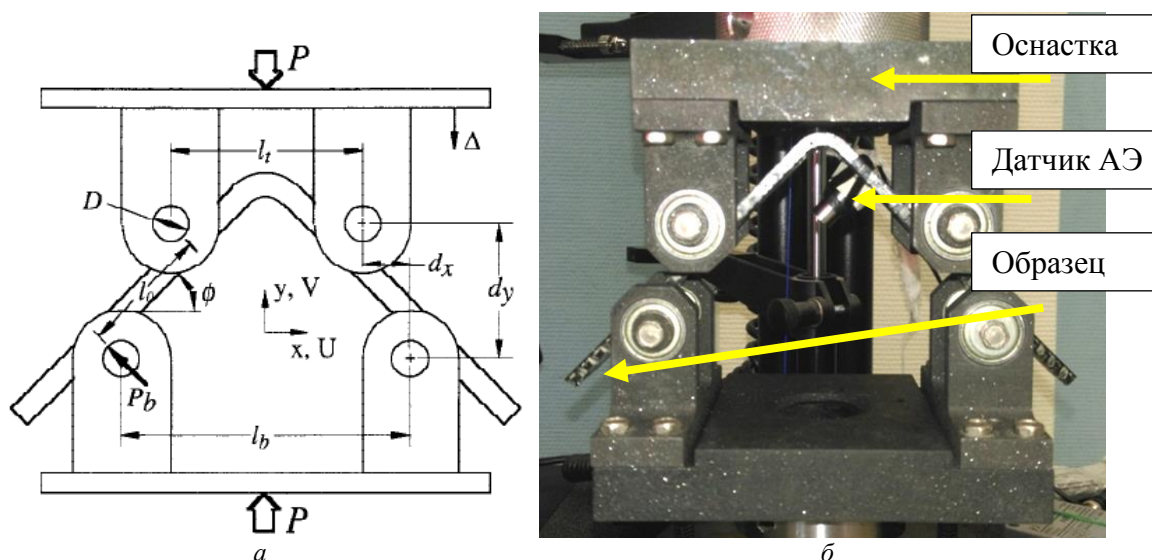


Рис.1. Схема испытания (а) и образец, установленный в оснастке с прикрепленным датчиком АЭ

Из испытаний по ASTM D6415 определялись следующие параметры: результирующая сила, прикладываемая к четырехточечному изгибающему приспособлению (P, Н); прочность изогнутой балки (CBS, Н) и соответствующий ей угол между горизонталью и ножкой образца (φ, град.). Характеристика CBS вычисляется по формуле:

$$CBS = \left(\frac{P}{2w \cos(\phi)} \right) \left(\frac{d_x}{\cos(\phi)} + (D + t) \tan(\phi) \right)$$

где D – диаметр цилиндрического силового вала (мм); t – средняя толщина образца (мм); w – средняя ширина образца (мм); φ – угол между горизонталью и ножкой образца (град.); d_x, d_y – горизонтальное и вертикальное расстояние между силовыми опорами (мм); P – результирующая сила, прикладываемая к четырехточечному изгибающему приспособлению (Н); Δ- относительное перемещение между верхней и нижней частью оснастки (мм).

Результаты испытаний, полученные в виде типовых диаграмм нагружения приведены на рисунке 2, а. В качестве информативного параметра сигналов АЭ был

выбран энергетический параметр (E , B^2c) [5, 6]. Путем суммирования значений энергетического параметра за все время нагружения образца, получено значение кумулятивной энергии сигналов АЭ ($KЭ$, B^2c). Характерные графики зависимости кумулятивной энергии от перемещения для слоистых образцов и слоистых образцов, усиленных в поперечном направлении методом прошивки Tufting представлены на рисунке 2, б. Характерные виды разрушения образцов углепластика представлены на рисунке 3.

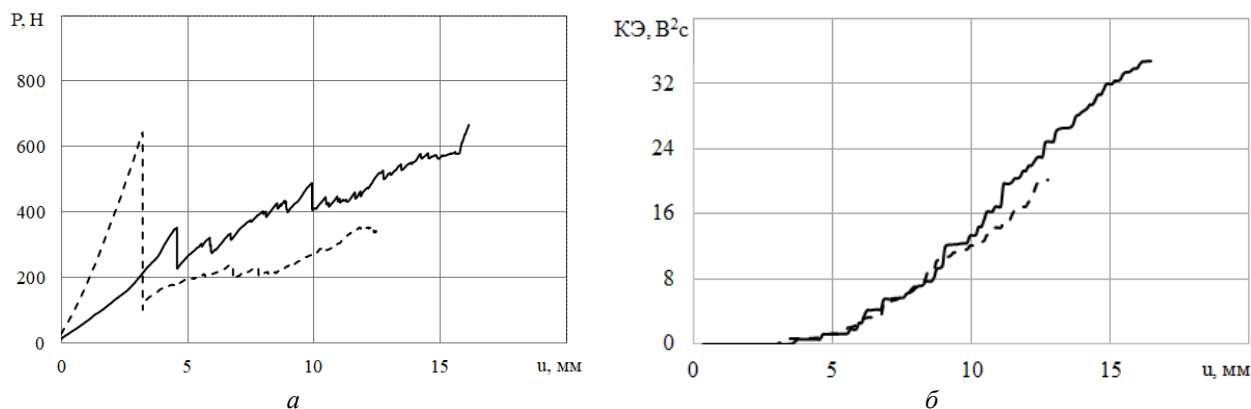


Рис.2. Типовые диаграммы нагружения (а) и зависимости кумулятивной энергии сигналов АЭ от перемещения подвижного захвата (б) для слоистого образца (пунктирная линия) и слоистого образца с прошивкой (сплошная линия)



Рис. 3. Характерные виды разрушения образцов слоистого углепластика (а) и слоистого углепластика с поперечной прошивкой (б)

Анализируя диаграммы нагружения, полученные характеристики и внешний вид разрушения образцов углепластиков после испытаний на четырехточечный изгиб можно отметить, что поперечная прошивка при данном виде нагружения является дополнительным структурным концентратором, который приводит к снижению несущей способности изогнутой балки (CBS) на 47% при почти одинаковых углах φ и увеличению на 49% значений относительного перемещения между верхней и нижней частью оснастки. Диаграммы нагружения качественно отличаются для образцов без прошивки и с прошивкой. По приведенным диаграммам нагружения (рис. 2) видно, что образец без прошивки упруго нагружается до максимальных значений несущей способности, далее происходит динамический срыв на 80-85%, после происходит равновесное закритическое деформирование поврежденного материала до полного разгибания кривой балки. Образец с прошивкой нагружается до максимальных значений несущей способности, далее происходит динамический срыв на 30-35%, после происходит перераспределение напряжений в поврежденной области образца и начинает работать прошивка, дополнительно ограничивая развитие расслоения, что приводит к увеличению значений несущей способности поврежденного материала относительно не поврежденного.

Анализируя полученные диаграммы зависимости значений кумулятивной энергии

сигналов АЭ для слоистых образцов и слоистых образцов, усиленных поперечной прошивкой, можно отметить, что графики имеют схожий характер, однако, предельные значения для слоистых образцов ниже на 16% при перемещениях равных 12 мм. Более высокие значения кумулятивной энергии сигналов АЭ для образцов, усиленных поперечной прошивкой, в отличие от образцов без прошивки, связаны с разрушением пучков волокон данной прошивки. Аналогичные зависимости фиксировались при испытаниях на растяжение этих материалов [7, 8].

Таким образом, экспериментально установлено влияние поперечной прошивки слоистых углепластиков на механическое поведение и прочность при четырехточечном изгибе кривой балки. Отмечено, что образцы слоистого углепластика без прошивки обладают большей жесткостью и несущей способностью до первого срыва на кривых нагружения, при этом большей остаточной несущей способностью обладает композит с поперечной прошивкой. Кроме того, композит с поперечной прошивкой имеет более высокие значения кумулятивной энергии сигналов АЭ, что связано с накоплением повреждений между слоями (разрушение матрицы) и разрывом пучков волокон в поперечной прошивке.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 18-01-00763 а, № 19-41-590005 р_а, № 18-31-00452 мол_а

Литература

1. Lobanov D. S., Vildeman V. E., Babin A. D., and Grinev M. A. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials // *Mechanics of Composite Materials*, — 2015 — Vol. 51 — No. 1 — pp. 69-79.
2. Cui W, Jianxin L, Ruo R. Interlaminar tensile strength (ILTS) measurement of woven glass/polyester laminates using four-point curved beam specimen // *Composites Part A*. — 1996; —27A:1097–105.
3. Saidane E.H., Scida D., Pac M., Ayad R. Mode-I interlaminar fracture toughness of flax, glass and hybrid flax-glass fibre woven composites: Failure mechanism evaluation using acoustic emission analysis // *Polymer Testing*. – Vol. 75. – 2019, pp. 246-253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.022>
4. Lessek F., Haeger A. Knoblauch V., Hloch S., Pude F., Kaufeld M. Acoustic emission for interlaminar toughness testing of CFRP: Evaluation of the crack growth due to burst analysis // *Composites Part B: Engineering*. – Vol. – 136. – 2018, pp. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.012>
5. Lobanov D.S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // *Procedia Structural Integrity*. – Vol. 18. – 2019. pp. 347–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.174>
6. Zubova E.M., Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Application the acoustic emission technique to investigation of damage initiation in composites // *Procedia Structural Integrity*. – Vol. 18. – 2019. pp. 347–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.234>
7. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2019. - №1. – pp. 173-183.
8. Strungar E. M., Feklistova E.V., Babushkin A.V., Lobanov D. S. Experimental studies of 3D woven composites interweaving types effect on the mechanical properties of a polymer composite material // *Procedia Structural Integrity*. – Vol. 17. – 2019. pp. 965–970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.128>

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ИСКУССТВЕННОЙ
НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ
РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ**
*DESIGNING ARCHITECTURE OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR
CLASSIFICATION USING ROBOTIC COMPLEXES*

Кононенко К.М.¹ – ассистент кафедры ИиИТ, **Демидов Д.Г.**¹ – к.т.н., доцент кафедры ИиИТ, **Винокур А.И.**¹ – д.т.н., директор ИПИТ, **Крупенин В.Л.**² – д.т.н., г.н.с.

¹Московский политехнический университет

²Институт машиноведения РАН

xeniaefim@gmail.com

Abstract. This article describes the basic principles of constructing artificial neural networks for pattern recognition on raster images using robotic complexes. The basic parts of convolutional neural networks are considered. Examples of evaluating the accuracy of preliminary testing results developed by the authors of a convolutional neural network model are given.

Keywords: pattern recognition, neural networks, convolutional neural networks, classification, information systems, artificial intelligence, robots.

Аннотация. В данной статье описываются основные принципы построения искусственных нейронных сетей для распознавания образов на растровых изображениях при помощи роботизированных комплексов. Рассмотрены базовые части сверточных нейронных сетей. Приведены примеры оценки точности результатов предварительного тестирования, разрабатываемой авторами модели сверточной нейронной сети.

Ключевые слова: распознавание образов, нейронные сети, сверточные нейронные сети, классификация, информационные системы, искусственный интеллект, роботы.

За последние десятилетие визуальное распознавание заняло одну из ведущих позиций в разработке машин, использующих искусственный интеллект. Использование автоматизированными производственными роботизированными комплексами визуальной информации выросло многократно – автоматическая сортировка, определение брака, определение физико-химических свойств объекта и т.п. С технической точки, для информационных систем, составляющих основу таких комплексов, визуальная информация по-прежнему предоставляется как набор пикселей. Для того, чтобы робот смог «осознано» обрабатывать данную информацию, требуется использовать и разрабатывать новые методы обработки. Одним из таких методов стали активно развивающиеся искусственные нейронные сети, которые способны обучать информационные системы идентифицировать объекты реального мира, подобно обучению маленького ребенка. Данный процесс, несмотря на очевидный прогресс, остается медлительным и непредсказуемым.

Сверточные нейронные сети, которые чаще всего используют для визуального распознавания в производственных комплексах, и которые доказали свою эффективность по сравнению с классическими полносвязными архитектурами нейронных сетей, также требуют усовершенствования.

Перед инженерами возникает задача – грамотно спроектировать архитектуру нейронной сети, которая позволила бы эффективно распознавать образы при помощи роботизированных комплексов. В настоящее время данная задача является крайне актуальной как при распознавании образов малыми роботами, так и при массовых производствах товаров – от продуктов питания до машиностроения.

Рассмотрим возможность проектирования сверточной нейронной сети для распознавания образов, в конкретном случае – классификации (сортировка по заданным категориям), объектов, которую возможно внедрить в роботизированный комплекс.

Главная причина, побуждающая к исследованию и созданию новой модели ИНС – это конкретизация предметной области (речь идет о роботизированных комплексах). Если присмотреться к набору изображений товаров конкретного производства, то можно увидеть, что по некоторым визуальным признакам изображения будут отличаться от набора таких же образов, допустим, в интернет-магазине. Такое отличие наталкивает на мысль, что между образами товаров на изображениях, полученных в одних и тех же условиях, существует некоторая связь, которую можно попытаться установить при помощи классификатора. В итоге, модель, комбинируя входные данные определенным образом, должна будет производить полезные прогнозы на ранее никогда не виденных данных – что и является машинным обучением.

Основу СНС составляет операция «свертка». В математике свертка представляет операцию комбинирования двух функций для получения новых значений. В машинном обучении, это комбинирование фильтра свертки (ядра свертки) и входной матрицы значений. Во время обучения СНС «запоминает» оптимальные значения для ядра свертки, которые позволяют ей извлекать значимые элементы (текстуры, края, фигуры) из входной карты объектов. По мере того, как количество фильтров (глубина карты выходных объектов), применяемых к входным данным, увеличивается, вместе с тем увеличивается количество признаков, которые может извлечь СНС.

После каждой операции свертки к выходной карте признаков применяется активационная функция «выпрямитель» ReLU (Rectified Linear Unit, формула 1):

$$F(x) = \max(0, x). \quad (1)$$

Основное преимущество данной функции при работе в СНС – это ее быстродействие, также значительным плюсом является ее свойство бороться с экспоненциальным затуханием весов при методе обратного распространения ошибки, так как ее градиент при $x > 0$ равен 1.

Следующим шагом в СНС проводят субдискретизацию (pooling) карт признаков. Субдискретизация позволяет повысить точность признаков изображения выбором из карты признаков лишь части значений. Чаще всего для субдискретизации используют функцию максимума. При субдискретизации значительно уменьшается пространственный объем карт признаков.

В итоге, структуру СНС можно представить в виде повторяющегося блока, состоящего из свертки и субдискретизации. Чем больше таких блоков, тем больше признаков будет извлечено из изображения. Одна из задач инженера, проектирующего такую сеть, не допустить переизбытка признаков и сбалансировать все блоки СНС таким образом, чтобы распознавание было максимально точным.

Завершающая часть мультиклассовых СНС, именно тех, которые предназначены для распознавания нескольких образов, – это полносвязные нейронные слои. Все нейроны первого слоя соединяется со всеми нейронами второго слоя, создавая возможность передачи сигнала к каждому нейрону двух слоев. Как правило, последний полносвязный слой содержит функцию активации «мягкого максимума» softmax (формула 2):

$$\sigma(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^N e^{z_k}}, \quad (2)$$

где (z_i – значение на выходе из i -го нейрона до активации, а N – общее количество нейронов в слое), которая выводит значение вероятности от 0 до 1 для каждого класса, которые модель пытается определить.

При проектировании СНС задача исследователя сводится к правильной настройке модели: выбору количества блоков свертки, фильтров свертки, настройке функций активаций и т.п. Подбор всех параметров индивидуален в каждой предметной области. В

итоге моя модель СНС для системы распознавания образов выйдет следующим образом (рисунок 1).

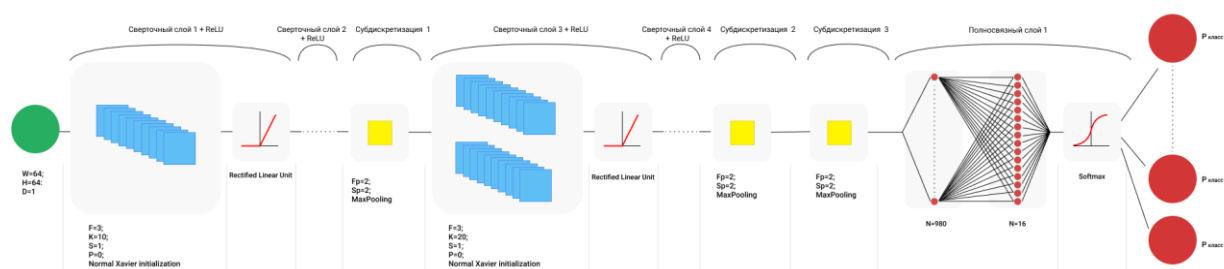


Рис. 1. Структура разрабатываемой СНС

Смоделированная ИНС используется в приложении в двух режимах: администрирования (происходит тренировка нейронной сети) и использования (сеть делает прогноз).

Входные данные в режиме тренировки представляют собой набор размеченных изображений, в режиме использования – изображение одно и его класс неизвестен. В саму ИНС на вход подаются значения пикселей с глубиной 1 (подаем черно-белое изображение).

Размер ядра свертки 3x3. Мелкий размер фильтра позволяет выделить больше деталей, но он очень чувствителен к шумам.

Размер матрицы субдискретизации определяем, как 2x2. Такой размер подходит для нашей модели, потому что в качестве входных данных мы получаем небольшие изображения (4096 пикселей), если в процессе тестирования увеличить размер входного изображения, то тогда размер матрицы субдискретизации тоже следует увеличить.

Заключительный слой сети, полносвязный, где количество нейронов равно количеству предсказываемых классов. В ходе работы ИНС на выходе получаем вероятность для каждого класса. Таким образом, самое большое значение вероятности можно понимать, как определение принадлежности объекта на изображении к соответствующему образу.

Для того, чтобы контролировать процесс обучения (обучается сеть или нет) и не проводить валидацию сети после каждого шага, я отслеживаю значения функции потерь на каждом шаге обучения (рисунок 2).



Рис. 2. График значений функции потерь на различных шагах обучения

Как видно из графика, на первых шагах идут колебания функции потерь, то есть алгоритм демонстрирует плохую сходимость градиента.

Важным замечанием при анализе эффективности работы модели ИНС для мультиклассовой классификации является то, что оперируемый набор данных в сети несбалансированный. Поэтому при оценке эффективности такие методы, как точность (ассигасу) или математическая корреляция, являются не достоверными. Для оценки несбалансированного набора данных используется F-мера (F1 score).

В таблице 1 приведены расчеты F-меры для всех оцениваемых моделей (Модель №1 – 6000, Модель №2 – 3000, Модель №3 – 1000, Модель №4 – 500 тренировок соответственно).

Таблица 1. Значения Precision, Recall и F-меры для моделей №1, №2, №3, №4

Название модели	Precision	Recall	F-мера
Модель №1	0,431	0,450	0,440
Модель №2	0,400	0,400	0,400
Модель №3	0,320	0,323	0,321
Модель №4	0,363	0,373	0,367

Из таблицы 1 видно, что самой точной является модель с более длительной тренировкой. Таким образом, предварительно можно заключить, что структура сети сконструирована верно, но для более точного результата требуется более длительная тренировка.

Успех систем распознавания во многом зависит от того насколько хорошо система обучена. Но очевидно, что больше половины успеха зависит от структуры, используемой СНС. Увеличение использования ИИ роботизированными комплексами для распознавания образов приводит к пересмотру классических структур нейронных сетей – нейронные сети требуют особого подхода к проектированию с учетом всех аспектов системы. В данной работе было предложено решение задачи распознавания образов для роботизированных комплексов. Точность данной модели составила 44%, но благодаря проведенным экспериментам можно увидеть тенденцию повышения точности распознавания за счёт улучшения процесса обучения (увеличение количества образцов и тренировок).

Литература

1. Местецкий Леонид. Курс лекций "Математические методы распознавания образов" // Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова. 04.05.11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.intuit.ru/studies/courses/2265/243/info> (дата обращения: 21.10.17).
2. Функции активации нейросети: сигмоида, линейная, ступенчатая, ReLu, tahn. 29.11.18 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/activation-functions/> (дата обращения: 10.12.18).
3. Попов В.А. ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ. ЧАСТЬ 1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ. – Казань: Лаборатория оперативной полиграфии издательства КФУ, 2013. - стр. 50.
4. Stanford University. Convolutional Neural Networks (CNNs / ConvNets), 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cs231n.github.io/convolutional-networks/#architectures> (дата обращения: 02.04.19).
5. Introduction to Loss Functions [В Интернете] / авт. Algorithmia Blog // Algorithmia Blog. – 30.04.2018 г. – 10.09.2018 г. - <https://blog.algorithmia.com/introduction-to-loss-functions/>.
6. Hao Zhang. Loss Functions in Neural Networks, 07.06.17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://isaacchanghau.github.io/post/loss_functions/ (дата обращения: 10.12.18).
7. Stanford University. Neural Networks, 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cs231n.github.io/neural/> (дата обращения: 01.04.2019).

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАССЫ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ *FORMATION OF THE SPACECRAFT ORBIT PATH FOR EARTH MONITORING*

Константинова А.П.¹ – студентка, **Лебедев В.В.**² – доктор технических наук, доцент

¹ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (НИУ)

²ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ)

nastya-konstantin@lenta.ru lebedev_v_2010@mail.ru

Abstract. The question of formation of the route of the spacecraft set by requirements of monitoring of a surface of the Earth from space is studied. On the example of the «Molniya» spacecraft, the software was debugged and the possibility of locating the route loop over lake Baikal for environmental monitoring was shown. Other forms of routes for practical application are offered.

Key words: spacecraft, track, orbit, monitoring.

Аннотация. Изучается вопрос формирования трассы космического аппарата, заданной требованиями мониторинга поверхности Земли из космоса. На примере космического аппарата «Молния» выполнена отладка программного обеспечения и показана возможность расположения петли трассы над озером Байкал для экологического мониторинга. Предложены другие формы трасс для практического применения.

Ключевые слова: космический аппарат, трасса, орбита, мониторинг.

Период обращения космического аппарата (КА) зависит от высоты орбиты. С математической точки зрения важен факт увеличения периода обращения КА с возрастанием высоты орбиты. В частности, период обращения КА по орбите, равный $T_{24} = 24$ часам, то есть периоду обращения Земли вокруг своей оси, будет на

геостационарной орбите (ГСО). Высота ГСО равна $h_{GSO} = \sqrt[3]{\frac{\mu_3 T_{24}^2}{4\pi^2}} - R_3 \approx 36000$ км. Если

КА находится ниже ГСО, то он обгоняет вращающуюся Землю в процессе своего орбитального движения, а если выше – отстаёт от вращения Земли. На этом свойстве баллистики была создана система космических аппаратов «Молния» с орбитами, трассы которых описывают петли на поверхности Земли. Задача исследования заключается в детальном изучении свойств петли трассы для достижения цели работы, то есть для формирования рациональной или оптимальной орбиты для наблюдения за конкретным районом поверхности Земли из космоса. В частности, требуется сформировать орбиту КА для наилучшего наблюдения за районом озера Байкал [1]. Для решения сформулированной задачи необходимо было создать математическую модель движения КА относительно поверхности вращающейся Земли. Для первичной оценки и иллюстрации положительного эффекта от предполагаемого результата нет смысла пользоваться сложными баллистическими программами, но вполне достаточно изучить невозмущённое движение КА по эллиптической орбите [2]. Задача решалась аналитически с привлечением компьютера и созданием программ на языке ПАСКАЛЬ в несколько этапов [3,4]. Для контроля правильности полученных промежуточных результатов в процессе решения задачи за основу были приняты следующие исходные данные и характеристики известной орбиты «Молния» со следующими параметрами: наклонение $i=62,8^\circ$; большая полуось $a=26561$ км; эксцентриситет $\varepsilon=0,725$; высота перигея $h_p=933$ км; высота апогея $h_a=39448$ км; радиус Земли $R_3=6371,210$ км; гравитационный параметр Земли $\mu_3 = GM_3 = 3,986004415 \text{ м}^3/\text{с}^2$ угловая скорость вращения Земли

$\omega_3 = 7,2921158553 \cdot 10^{-5}$ рад/с. Сначала было проведено описание эллиптической траектории: удаление апогея от центра Земли $r_a = R_3 + h_a$, удаление перигея от центра Земли $r_n = R_3 + h_n$, фокальный параметр $p = r_a(1 - \varepsilon)$, уравнение эллипса в полярных координатах $(r; \varphi)$ записывается в виде $r = r(\varphi) = \frac{p}{1 + \varepsilon \cdot \cos \varphi}$. Для моделирования

движения КА по эллиптической орбите в полярных координатах $(r; \varphi)$ достаточно изменять полярный угол φ от 0° до 360° и вычислять полярное удаление r . Шаг изменения полярного угла удобно выбрать постоянным, а для повышения точности расчётов уменьшать его. При отладке программы этот шаг был 10° , затем был уменьшен до 1° , но табличный редактор EXCEL позволяет работать с шагом $0,01^\circ$, чтобы строить графики по 36000 точкам.

Переход от полярной системы координат к декартовой выполняется по формулам $\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \end{cases}$. Новая система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ получается из начальной системы поворотом на угол i вокруг оси $OY=OY_1$. Схема такого преобразования координат показана на рис.1.



Рис.1. Системы координат для построения трассы КА

Наклонение плоскости орбиты КА к плоскости экватора Земли обозначим символом i . Для поворота плоскости орбиты КА вокруг оси OY от плоскости экватора Земли до указанного наклонения i надо выполнить соответствующее преобразование координат $\|x_1 y_1 z_1\| = \|x y z\| \cdot M_y(i)$, где матрица преобразования-поворота имеет вид

$$M_y(i) = \begin{bmatrix} \cos i & 0 & -\sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin i & 0 & \cos i \end{bmatrix}. \text{ В развёрнутом виде получаем следующие рабочие формулы}$$

$$\text{сначала в матричном виде, } \|x_1 y_1 z_1\| = \|x y z\| \cdot \begin{bmatrix} \cos i & 0 & -\sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin i & 0 & \cos i \end{bmatrix}, \text{ а затем в виде системы}$$

$$\text{трёх уравнений } \begin{cases} x_1 = x \cos i + 0 - z \sin i ; \\ y_1 = 0 + y + 0 ; \\ z_1 = -x \sin i + 0 + z \cos i . \end{cases}$$

Учитывая начальные полярные координаты $(r; \varphi)$ и переход от них к плоскую декартову прямоугольную систему $(x; y)$, а затем в трёхмерную $(x; y; z)$, получаем

общие формулы преобразования полярных координат в координаты $(x_1; y_1; z_1)$ повернутой вокруг оси OY на угол i системы

$$\begin{cases} x_1 = r \cos \varphi \cos i + 0 - z \sin i ; \\ y_1 = 0 + r \sin \varphi + 0 ; \\ z_1 = -r \cos \varphi \sin i + 0 + z \cos i . \end{cases}$$

В полученных формулах $z = 0$, поэтому
$$\begin{cases} x_1 = r \cos \varphi \cos i ; \\ y_1 = r \sin \varphi ; \\ z_1 = -r \cos \varphi \sin i . \end{cases}$$

В результате получен вектор $(x_1; y_1; z_1)$ текущей точки эллипса в повернутой системе координат.

Поворот плоскости эллиптической траектории на величину наклона i сформировал новые координаты текущей точки орбиты

$$\|x_1 \ y_1 \ z_1\| = \|x \ y \ z\| \cdot \begin{vmatrix} \cos i & 0 & -\sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin i & 0 & \cos i \end{vmatrix}, \text{ которые потом были пересчитаны в географическую}$$

широту и долготу
$$\begin{cases} \varphi_g = \varphi_{g0} = \arctg \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} ; \\ \lambda_g = \lambda_{g0} - \omega_3 t = \arctg \frac{y_1}{x_1} - \omega_3 \sum \frac{S_{\Delta i}}{S_{ell}} T . \end{cases} \quad \text{Учёт времени движения КА}$$

по эллиптической орбите выполнен на основе второго закона Кеплера (закона площадей). При орбитальном движении радиус-вектор КА за равные промежутки времени описывает равные площади. Сначала в программе была вычислена площадь эллипса орбиты КА по формуле $S_{ell} = \pi ab = \pi a^2 \sqrt{1-e^2}$, так как малая полуось b эллипса выражается через его большую полуось a и эксцентриситет e по формуле $b = a\sqrt{1-e^2}$. Потом был вычислен

период обращения КА по эллиптической орбите вокруг Земли по формуле $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu_3}}$,

который был сопоставлен площади эллипса орбиты S_{ell} . Далее шаг изменения времени при движении КА по эллиптической орбите был предположен маленьким, чтобы пренебречь величиной изменения Δr_i удалённости объекта от Земли на участке i орбиты, а также искривлением траектории на этом небольшом участке орбиты. Тогда ометаемую радиус-вектором площадь можно приближённо предполагать равной площади треугольника $S_{\Delta i} = 0,5 r_i^2 \sin \varphi_i$. Продолжительность движения КА по этому малому участку орбиты можно приближённо вычислить с помощью второго закона Кеплера (закона площадей) по формуле $\Delta t_i = \frac{S_{\Delta i}}{S_{ell}} T$. Общая продолжительность движения КА от

точки перигея до текущего положения на эллиптической орбите получается суммированием продолжительностей всех предыдущих элементарных участков

$$t = \sum \Delta t_i = \sum \frac{S_{\Delta i}}{S_{ell}} T . \text{ Подставляем это время в формулу для географической долготы}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_g = \varphi_{g0} = \arctg \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} ; \\ \lambda_g = \lambda_{g0} - \omega_3 t = \arctg \frac{y_1}{x_1} - \omega_3 \sum \frac{S_{\Delta i}}{S_{ell}} T . \end{array} \right.$$

Задача построения трассы КА решена.

Решение задачи построения трассы КА реализовано на компьютере с помощью языка программирования ПАСКАЛЬ. На рис.2 показан окончательный реальный вариант трассы КА «Молния» с учётом вращения Земли.



Рис.2. Примеры построения двух трасс орбит КА

Разработанный методический материал позволяет исследовать любые эллиптические орбиты с позиции анализа трасс космических аппаратов.

Например, на рис.2 показана трасса КА, выведенного на орбиту с наклонением $i=63,435^\circ$, высотой перигея $h_p=1000$ км, высотой апогея $h_a=50000$ км. За один виток по орбите КА смещается по географической широте приблизительно на 110° , то есть петля трассы будет вращаться по долготе.

Полученные результаты позволяют сформулировать основной вывод.

Подбирая параметры орбиты, можно сформировать трассу КА, наиболее благоприятную для наблюдения заданного района поверхности Земли. Для экомониторинга озера Байкал петля трассы должна находиться над водоёмом. Интересен факт относительного движения КА вдоль земной параллели при сильно вытянутых высоких эллиптических орбитах с эксцентриситетом, близким к единице. Такие орбиты требуют отдельного изучения.

Литература

1. Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Урлич Ю.М. Глобальные проблемы человечества и космос. – М.: «Изд.МАКД», 2010. – 570 с.
2. Акимов А., Гриценко А., Степанов А., Чазов В. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи / Спутниковая связь и вещание, 2016. – С.72-87.
3. Константинова А.П. Получение новой информации об экологии Байкала с помощью старых орбит "Молния" / Материалы XXX Международной конференции "Современные информационные технологии в образовании 2019". Часть 2. Ред. группа: Алексеева О.С. и др. - Троицк-Москва, 25 июня 2019 г. – Изд-во "Тривант", 2019. – 167 с. – Ил. – ISBN 978-5-89513-446-7. – С.113-115.
4. Эл. ресурс: <https://ito2019.bytic.ru/uploads/files/compilation2019.pdf>
5. Лебедев В.В., Иванов В.Л., Меньшиков В.А., Пчелинцев Л.А. Космический мусор. В 3-х томах. Том.1. - М.: Патриот, 1996. - 360 с.

ДЕСУЛЬФАТАЦИЯ СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ DESULFATE LEAD BATTERIES

М.А.Косарева – студент
МБОУ «Гимназия №5» (г.Королёв)
milena.kosareva.04@bk.ru

Abstract. Sulfation of lead-acid batteries is an unsolved technical problem. From the chemical point of view, the sulfation process is explained by the interaction of lead in battery plates with concentrated sulfuric acid. As a result, lead II sulfate is formed on the plates, which prevents the passage of electric current not only during the discharge of the battery, but also during charging. The aim of the work is to create a household electronic device for desulfatation of lead-acid batteries. In this work the particular problem of determining the main electrical characteristics of the electronic desulfator is solved.

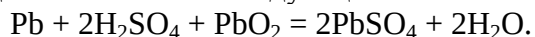
Key words: electrochemistry, desulfate, lead battery.

Аннотация. Нерешённой технической проблемой является сульфатация кислотно-свинцовых аккумуляторов. С позиции химии процесс сульфатации объясняется взаимодействием свинца в аккумуляторных пластинах с концентрированной серной кислотой. В результате на пластинах образуется диэлектрик сульфат свинца II, который препятствует прохождению электрического тока не только во время разряда аккумуляторной батареи, но и в процессе зарядки. Цель работы заключается в создании бытового электронного устройства для десульфатации кислотно-свинцовых аккумуляторов. В этой работе решается частная задача по определению основных электрических характеристик электронного десульфатора.

Ключевые слова: электрохимия, десульфатация, свинцовый аккумулятор.

Химический процесс сульфатации свинцово-кислотного аккумулятора известен более полувека и подробно описан в научно-технической литературе, например, по электрохимии [1,2,3].

Реакция сульфатации описывается следующим химическим уравнением:



При правильном применении свинцово-кислотного аккумулятора сульфатация происходит медленно, поэтому о ней потребители обычно не вспоминают. Неприятности начинаются при грубых нарушениях правил пользования аккумуляторами, основными из которых являются:

- 1) глубокий или даже полный разряд аккумулятора;
- 2) длительное хранение разряженного аккумулятора;
- 3) долгое отсутствие сетевой зарядки аккумулятора;
- 4) напряжённый режим работы в городском цикле;
- 5) внедрение в автомобили экологической опции «стоп-старт» и др.

При сульфатации аккумулятора сульфат свинца II плотно покрывает свинцовые пластины белой диэлектрической плёнкой, сначала тонкой, но потом значительной. Диэлектрическая плёнка может стать такой плотной и толстой, что даже напряжение порядка 100В не сможет обеспечить процесс зарядки аккумулятора.

Процесс сульфатации происходит как при штатном разряде аккумулятора, так и при хранении. Но особенности этого процесса принципиально различны. При штатной работе образуются кристаллы сульфата свинца II, которые потом при зарядке аккумулятора вновь переходят в чистый свинец и оксид свинца IV. При саморазряде аккумулятора при долгом хранении, при малом токе саморазряда, кристаллы сульфата свинца II становятся очень мелкими, изолируют рабочие пластины от электролита, препятствуют прохождению электрического тока в цепи внутри аккумулятора.

Получается, что сульфатированный аккумулятор нельзя зарядить, поэтому его приходится утилизировать или просто выбрасывать, а взамен покупать новый. Цель работы заключается в создании бытового электронного устройства для десульфатации кислотных свинцовых аккумуляторов, не требующего лабораторного оборудования. В этой работе решается частная задача по определению основных электрических характеристик электронного десульфатора [5]. В настоящей работе электронная схема была повторена, а потом было предложено новое устройство - схема генератора с качающейся частотой импульсов. В этом устройстве диэлектрическая плёнка сульфата свинца II разрушается от воздействия импульсов тока продолжительностью 7-10 мкс при частоте следования 30 кГц и величине амплитудного напряжения до 20 В. Недостатком предлагаемого устройства является регулируемая частота, смысл регулировки которой теряется, потому что оптимальная или рациональная частота десульфатации индивидуальна для каждого аккумулятора. В настоящей работе предлагается принципиально усовершенствовать электронный блок управления десульфатором свинцово-кислотных аккумуляторов.

Сначала на макетной плате была повторена электронная схема десульфатора без подключения аккумулятора, чтобы определить величину сопротивления и электроёмкости в блоке управления. Были получены два главных вывода. Во-первых, в десульфаторе достаточно регулировать сопротивление реостата от 10 кОм (частота 40 кГц) до 30 кОм (частота 17 кГц). Во-вторых, импульсы длительностью 3,3 мкс со скважностью 10, или коэффициентом заполнения 0,1 (10%), при линейной частоте 30 кГц обеспечиваются генератором при сопротивлении реостата 15 кОм и при электроёмкости конденсатора 4 нФ. Но главное, была обоснована необходимость дополнения схемы генератором сигналов плавающей частоты десульфатации, которая не известна и индивидуальна для каждого аккумулятора. Это новизна предстоящей перспективной работы. Схема лабораторного электронного блока управления десульфатором взята из статьи [5] и показана на рис.1.



Рис.1. Электронный блок управления десульфатором

Для проверки правильности сформулированных гипотез и предположений о возможности улучшения процесса десульфатации были проведены три опыта по восстановлению долго хранившихся без применения старых аккумуляторных батарей. Первый аккумулятор был выведен из эксплуатации год назад из-за снижения электроёмкости и плохого процесса зарядки. Второй аккумулятор от компьютерного блока бесперебойного питания хранился без применения 7 лет. Третий аккумулятор не применялся 4 года. Режим десульфатации был выбран почти таким же, как в статье [5], но длительность импульсов была уменьшена с 7-10 мкс до 3-5 мкс. Частота импульсов 30 кГц была сохранена, амплитуда импульсов была увеличена с 20 В до 27 В. Длительность импульса была уменьшена до 3 мкс, чтобы более явно выявить факт начала процесса десульфатации. Действительно, такие импульсы при скважности 10 и вдвое повышенной амплитуде в пять раз слабее заряжают аккумулятор, чем постоянный ток. На рис.2 показаны характерные осциллограммы процесса восстановления этих трёх кислотных свинцовых аккумуляторных батарей.

Характеристики импульсов при отладочном напряжении питания 12 В показаны на осциллограммах №1 и №2. После подключения входного стабилизатора напряжения на основе микросхемы 7812 амплитуда импульсов была увеличена до 27 В, то есть до предельного режима работы микросхемы-стабилизатора напряжения. Кратковременные включения показали, что устройство работает даже при напряжении 40 В, но микросхема может перегореть в любой момент. Первый аккумулятор через 20 минут после подключения к десульфатору показал осциллограмму №3 нормальной батареи. Фактически это нормальный аккумулятор с тонким слоем сульфата свинца II на пластинах, который очень быстро был разрушен с помощью собранного устройства. Второй аккумулятор с самым большим сроком пассивного хранения и начальным напряжением всего 0,5 В сначала показывал осциллограмму №4 полностью вышедшего из строя устройства. Однако через 4 часа на осциллограмме №5 появились сначала небольшие пики, через 8 часов десульфатации пики стали выражены явно, появилась возможность подключить штатное зарядное устройство.

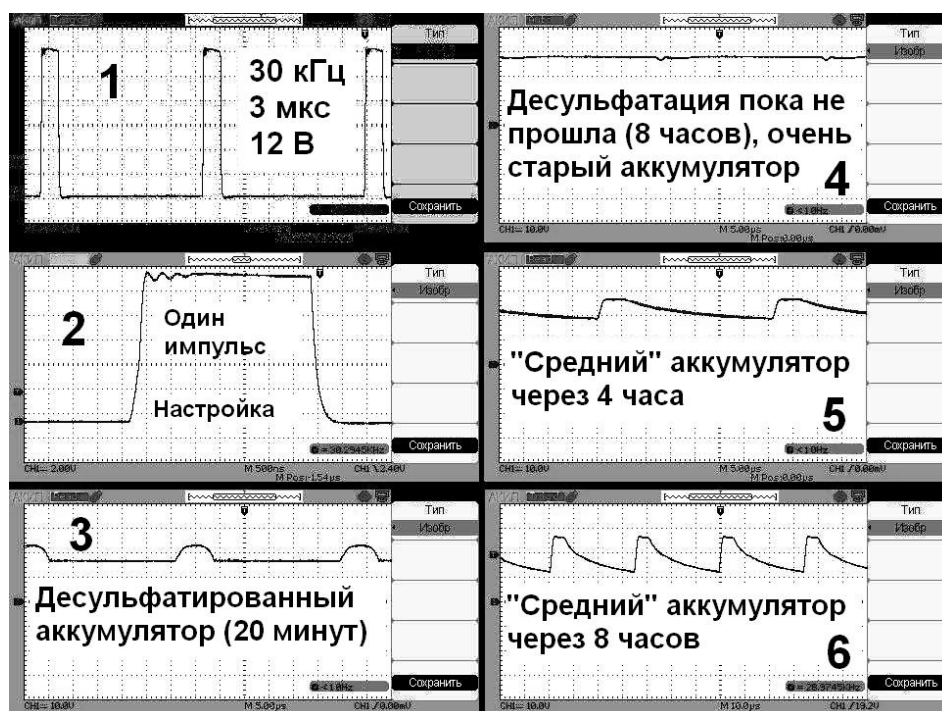


Рис.2. Характерные осциллограммы процесса десульфатации

После зарядки аккумулятора сравнительно слабым током 300 мА при допустимом токе заряда 2800 мА контрольная осциллограмма №3 на десульфаторе показала нормальный режим работы батареи. На рис.1 показан график возрастания тока зарядки второго аккумулятора в процессе десульфатации свинцовых пластин. Начальный ток зарядки был 9 мА при напряжении 27 В, то есть соответствовал внутреннему сопротивлению батареи 3 кОм. Через 4 часа после начала процесса десульфатации ток заряда увеличился до 27 мА при напряжении 27 В, то есть внутреннее сопротивление батареи уменьшилось в три раза и стало равно 1 кОм. При дальнейшей работе с этим аккумулятором внутреннее сопротивление снизилось до 1 Ом, что доказало эффективность процесса десульфатации с помощью предложенного устройства. Третий аккумулятор, хотя и хранился 4 года в пассивном режиме, а не 7 лет, как второй аккумулятор, даже после восьми часов десульфатации не удалось «оживить», осциллограмма №4 продолжала оставаться почти в виде линии, что доказывает очень толстый слой мелкокристаллического оксида свинца II на рабочих пластинах. Самый плохой аккумулятор обеспечивал ток заряда 3 мА при напряжении 30 В, то есть имел внутреннее сопротивление 10 кОм, которое пока не удалось уменьшить. Объяснить такое

большое внутреннее сопротивление можно толстой плёнкой сульфата свинца II на рабочих свинцовых пластинах. Была высказана гипотеза, что при более длительных сроках процесса десульфатации толстая плёнка диэлектрика будет постепенно разрушена, поэтому опыты с этим аккумулятором продолжаются.

Экономический эффект от внедрения нового устройства основан на большом рынке свинцовых аккумуляторов. Сейчас этот рынок оценивается одним миллиардом автомобильных аккумуляторов со средней стоимостью 5000 рублей, то есть пятью триллионами рублей. Средний срок службы аккумулятора равен пяти годам, то есть амортизационные потери составляют 1 трлн. руб. в год. Если десульфатор увеличит срок службы даже на 20%, то на этом рынке освобождаются финансовые средства 200 млрд. руб. в год. Даже если на каждом десятом автомобиле каждый десятый владелец захочет внедрить новое устройство, то первичный рынок будет равен 2 млрд. руб. в год.

Вывод. Предлагаемое направление исследований по созданию электронного десульфатора аккумуляторов выгодно как в техническом плане, так и в экономическом, то есть является инновационным внедрением.

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 года № 642.2.
2. Федотьев Н.П. Прикладная электрохимия. Химия, 1962. 642 с.
3. Дувинг В.Г., Казаринов И.А., Бурашникова М.М. Устройство для заряда сульфатированного свинцово-кислотного аккумулятора импульсным асимметричным током // Электрохимическая энергетика. 2012. Т.12, №1. С.21-24.
4. Для чего нужна десульфатация аккумулятора и как её проводить? Электронный ресурс: <http://akbinfo.ru/ustrojstvo/desulfatacija-akkumulyatora.html>
5. Электронное восстановление аккумулятора. Электронный ресурс: <https://sdelaysam-svoimirukami.ru/4038-elektronnoe-vosstanovlenie-akkumulyatora.html>
6. Косарева М.А. Десульфатация кислотно-свинцовых аккумуляторов / Материалы XXX Международной конференции "Современные информационные технологии в образовании 2019". Часть 2. Троицк-Москва, 25 июня 2019 г. Изд-во "Тровант", 2019. 167 с. Направление: Детская конференция "Умный дом руками детей". С.115-117. Эл. ресурс: <https://ito2019.bytic.ru/uploads/files/compilation2019.pdf>
7. Косарева М.А. Электронный блок для управления десульфатором свинцово-кислотных аккумуляторов / Механика и моделирование материалов и технологий. Сборник трудов. Секция Международной молодёжной научной конференции "XLV Гагаринские чтения", 16-19 апреля 2019 г. М.: ИПМех РАН, 2019. 198 с.
8. Косарева М.А. Формирование требований к электронному блоку управления десульфатора свинцово-кислотных аккумуляторов / Материалы Международного молодёжного научного форума "Ломоносов 2019" 8-12 апреля 2019 г. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова.
9. Косарева М.А. Электронный блок для управления десульфатором свинцово-кислотных аккумуляторов / Г12 Гагаринские чтения - 2019: XLV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. С.962-963. Эл. ресурс: https://gagarin.mai.ru/files/2019/Abstracts_2019.pdf

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТОВ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ

CRACK ENDURANCE OF DISPERSE STRENGTHENED COMPOSITES

Котов Г.П. – студент, Лукьянов М.Н. – ст. преподаватель, Пирожков В.А. – доцент,
к.т.н.

Московский политехнический университет
glebkotov@mail.ru

Abstract. Authors have realized the series of experiments to study the problem how the curvature radius in the tip of crack-like notch influences upon threshold values of strain intensity coefficient (SIC). Derived results concerning to the sizes of predestruction zones cast doubt on both versatility and certainty of some models now accepted to explain how dispersed phase inclusions influence upon crack endurance of fragile composites. These data provide the more grounded approach to simulating the processes of material decrepitation and may be used to choose the most optimal (for reasons of the crack endurance) volume content of disperse phase particles in the composite material.

Key words: Composites, disperse strengthened composites, polymer matrix of composite, disperse phase in the composite structure, crack development in composite material, crack endurance of the composite, volume content of mineral filler particles, predestruction zone near crack tip, simulation of fragile material decrepitation, normal fracture.

Аннотация. Авторами проведена серия экспериментов по исследованию влияния величины радиуса закругления вершины трещиноподобного разреза и коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Полученные данные о размерах зон предразрушения ставят под сомнение универсальность и достоверность некоторых существующих моделей влияния включения дисперсной фазы на трещиностойкость хрупких композитов, позволяют более обоснованно подходить к моделированию процесса их растрескивания и могут быть использованы при выборе оптимального, с точки зрения трещиностойкости, содержания частиц дисперсной фазы в материале.

Ключевые слова: композиты, дисперсно-упрочненные композиты, полимерная матрица композита, дисперсная фаза композита, развитие трещин в композиционном материале, трещиностойкость композита, объемное содержание частиц минерального наполнителя, зона предварительного разрушения в верхней части трещины.

Современные дисперсно-упрочненные композиционные материалы с полимерной матрицей широко применяются при изготовлении изделий различного назначения. Введение минеральной дисперсной фазы в состав композита позволяет значительно снизить расход дефицитных полимерных смол, а также повысить твердость, жесткость и износостойкость материала. Объемное содержание дисперсной фазы оказывает весьма заметное влияние на способность хрупкой полимерной матрицы противостоять развитию в ней трещин. Поскольку трещиностойкость материала зависит от интенсивности развития в малой окрестности конца трещины процесса, предшествующего локальному акту разрушения.

В настоящей работе, авторами предпринята попытка проследить взаимосвязь между размерами зон предназначенного материала в вершинах трещины нормального отрыва и объемным содержанием в композите частиц дисперсного наполнителя.

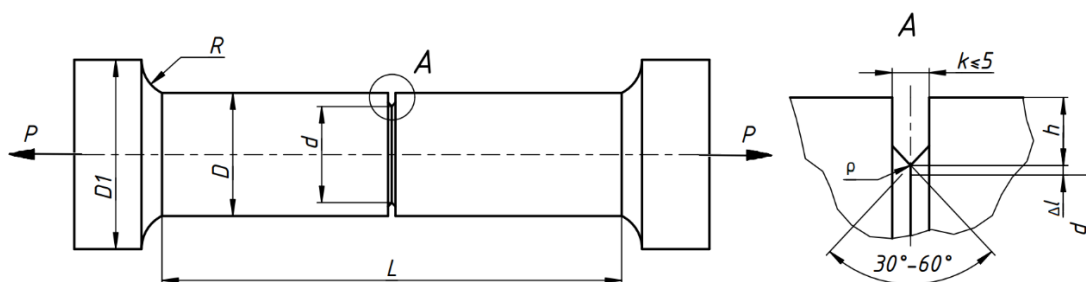


Рис. 1. Цилиндрический образец для испытаний на осевое растяжение $d = (0.6...0.7) D$; $D_1 = 1.5 D$; $h = 0.16 D$; $R = 0.5 D$; $L = 5 D$; Δl — глубина роста усталостной трещины

С этой целью была проведена серия экспериментов, в которых использовались цилиндрические образцы с кольцевой усталостной трещиной и квазитрещиной при различных значениях радиуса закругления его вершины ρ . Эти образцы подвергались нагружению до разрушения осевым растягивающим усилием (рис.1). Образцы были изготовлены из эпоксидной смолы холодного отверждения ЭД-20 и композитов, состоящих из указанного эпоксидного компаунда 25 или 50% содержанием тонкодисперсной фазы - кварцевой муки с размером частиц 10^{-6} м. Методика подготовки и проведения испытаний была принята в точном соответствии с указаниями [1].

В работе исследовался вопрос о влиянии размера радиуса скругления вершины кольцевого трещинообразного надреза на критические значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Вычисление значений параметра трещиностойкости K_{1c} осуществляли соответственно по данным работы [2].

$$K_{1c} = \frac{4P}{d^2} \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} \cdot \frac{1-\varepsilon}{4-2.3\varepsilon} \right); \varepsilon = \frac{d}{D} \quad (1)$$

где D – диаметр образца; d – диаметр нетто-сечения;

Результаты приведенных исследований представлены на рис.2.

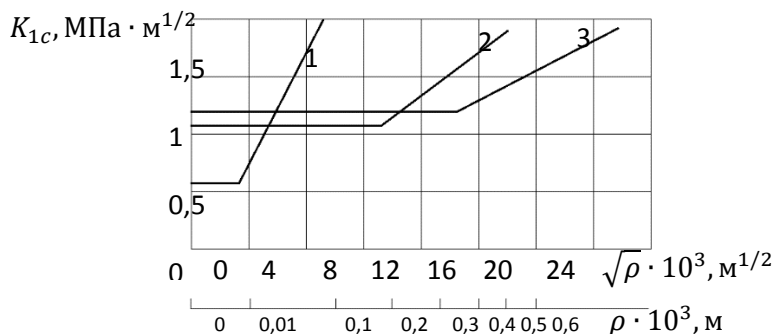


Рис. 2. График зависимости параметра K_{1c} от радиуса ρ скругления вершины надреза
1 - компаунд без наполнителя; 2, 3 - композиты, содержащие 25 и 50 об. % наполнителя соответственно

Анализ зависимостей, изображенных на этом рисунке, позволяет сделать вывод, что при нормальном отрыве квазитрещина остается не чувствительной к увеличению степени ее затупленности до определенного предела. Исходя из концепции тонкой структуры торца трещины [2], логично предположить, что независимость КИН от степени тупости торца квазитрещины может иметь место до тех пор, пока величина радиуса ρ на его вершине не превысит размер r зоны предварительного разрушения (рис.3) внутри которого материал уже не может рассматриваться как однородный, бесконечно делимый, структурный. Тупость трещинообразования, выходящая за пределы характерного размера зоны предразрушения, не способна, очевидно, оказывать сколько-нибудь заметное влияние на распределение напряжений в упругой области вокруг торца трещины и,

следовательно, в конечном итоге на величину параметров трещиностойкости.

Результаты проведенных исследований позволяют констатировать, что в композитах с большим объемным содержанием наполнителя в вершинах трещин образуются большие зоны предразрушения, нормального отрыва. Согласно данным (рис. 2) при введении в состав эпоксидной смолы 25 и 50 об% дисперсной фазы, размер радиуса зоны предразрушения в вершине трещины нормального отрыва увеличивается соответственно с $0,005 \cdot 10^{-3}$ м до $0,16 \cdot 10^{-3}$ м и $0,35 \cdot 10^{-3}$ м.

Если упрощенно считать форму области предразрушения в вершине трещины круглой, то величину ее радиуса при плоской деформации можно определить по формуле [3]:

$$r = \frac{k_{lc}^2}{4\sqrt{2}\pi\sigma_b^2} \quad (2)$$

где под σ_b в нашем случае следует понимать величину предела прочности, так как именно эта характеристика определяет предельное состояние материала в момент разрушения. Вычисления, выполненные по этой формуле с учетом установленных опытным путем значений σ_b (см. табл.)

Таблица 1

Характеристика	Объемное содержание дисперсной фазы V_x , %			
	0,0	12,5	25,0	50,0
σ_b , МПа	88,2	64,7	56,8	49,0

показывают, что введение в эпоксидный компаунд 12,5; 25,0 и 50,0 об. % тонкодисперсного наполнителя марки КП-3 также приводит к увеличению протяженности зон предразрушения в вершинах трещин нормального отрыва от $0,002 \cdot 10^{-3}$ м до $0,012 \cdot 10^{-3}$ м; $0,021 \cdot 10^{-3}$ м и $0,033 \cdot 10^{-3}$ м соответственно, то есть в среднем только на порядок, что значительно меньше экспериментально установленной интенсивности их роста.

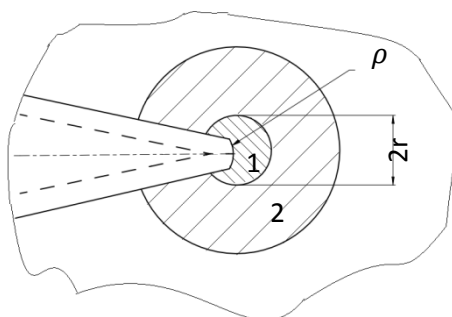


Рис.3. Схема структуры конца трещины

1 - зона предразрушенного материала; 2 - область упругой асимптотики; ρ - радиус скругления вершины трещины; $2r$ - характерный линейный размер зоны предразрушения

Тем не менее, полученные данные о размерах зон предразрушения в вершинах трещин нормального отрыва ставят в сомнение универсальность и достоверность предложенной в работах [4,5] модели влияния включений дисперсной фазы на энергию разрушения хрупких композитов, согласно которой, происходит в результате увеличения длины фронта трещины за счет его изгибания до полуокружности между каждой парой рядом расположенных частиц наполнителя, превышающих по размеру структурные элементы матрицы. Так, при объемном содержании дисперсной фазы $V_f = 12,5$ % при котором, выбранному для изучения классу композитных материалов свойственно максимальное значение энергии разрушения, среднее расстояние δ (рис. 4) между частицами наполнителя величиной $\theta = 10^{-6}$ м, вычисленное по известной формуле $\delta = \theta(1 - V_f)/3V_f$ составляет всего лишь $\delta \sim 0,0047 \cdot 10^{-3}$ м.

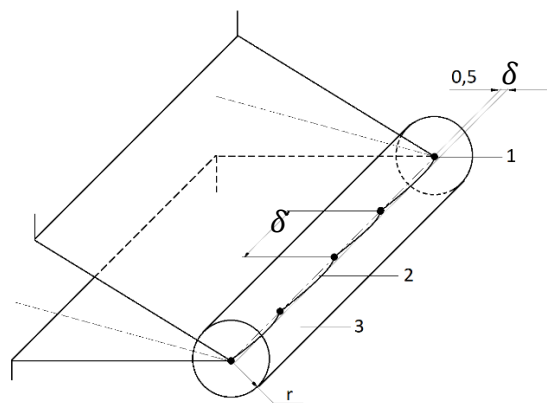


Рис. 4. Схема взаимодействия фронта трещины с дисперсными неоднородностями
1 - частица наполнителя, 2 - искривленная линия фронта трещины перед прорывом, 3 - зона
предразрушения

Нетрудно видеть, что даже в случае, согласно которому мнения авторов [4,5], должно быть свойственно максимальное проявление эффекта искривления фронта трещины, область предразрушения размером $2r$ способна поглотить все предполагаемые прогибы фронта трещины, обусловленные его взаимодействием с частицами дисперсного наполнителя.

Результаты, приведенные в настоящей работе исследований, могут способствовать более обоснованному подходу и моделированию процессов растрескивания хрупких дисперсно-наполненных композитов.

Литература

1. Методические рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов полимерной матрицей. Определение характеристик трещиностойкости полимерных композиционных материалов - Львов: Физ.-механич. ин-т им. Г.В. Крапенко, 2014.
2. Панасюк В.В., Андрейкин Л.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. Киев: Наук. думка, 1997.
3. Партон В.З. Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 2005, 502с.
4. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. СПб: Профессия, 2010.
5. Лент Ф.Ф., Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице. – В кн.: Композиционные материалы. Разрушение и усталость. / Под ред. Л. Браутмана. Т. 5. – М.: Мир, 2008, с. 11-57.

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ
ИССЛЕДОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ
МИКРОПОЛЯРНЫХ СЕТЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ¹**
*JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF NUMERICAL METHODS IN THE
STUDY OF NONLINEAR MICROPOLAR MESH CYLINDRICAL PANELS'S
OSCILLATIONS*

Крылова¹ Е.Ю. – к.ф.-м.н., доцент, **Папкова² И.В.** – к.ф.-м.н., доцент,
Синичкина² А.О. – аспирант

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г.Чернышевского

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Kat.krylova@bk.ru

Abstract. Based on the micropolar and the Kirchhoff-Love theories, the mathematical model of the cylindrical mesh panel's oscillations is constructed. The panels are consisting of two families of mutually perpendicular edges. The scenarios of the transition of panel oscillations to chaos are investigated. To justify the reliability of the results obtained, the numerical implementation was carried out by fundamentally different numerical methods. The conclusion is drawn about the optimal combinations of methods for the numerical implementation of the task.

Key words: cylindrical mesh panels, nonlinear oscillations.

Аннотация. На основании микрополярной теории и теории Кирхгофа-Лява построена математическая модель колебаний цилиндрических сетчатых панелей, состоящих из двух семейств взаимно перпендикулярных ребер. Исследован сценарий перехода колебаний панели в хаос. Для обоснования достоверности получаемых результатов, численная реализация велась принципиально разными численными методами. Сделан вывод об оптимальных комбинациях методов численной реализации поставленной задачи.

Ключевые слова: сетчатые цилиндрические панели, нелинейные колебания.

Сетчатые цилиндрические пластины, панели и оболочки широко применяются как элементы инженерных конструкций в стратегически важных отраслях экономики: приборостроении, робототехнике, медицине. Поэтому вопросам изучения действия на их поведение различных нагрузок посвящены многие работы, однако в них не учитывается масштабный эффект, оказывающий существенное влияние при уменьшении размеров рассматриваемых механических систем до микро и нано уровня. При определенных параметрах внешних воздействий механическая система может перейти в хаотический динамический режим, что, в свою очередь, может привести к погрешностям в работе приборов и механизмов, элементами которых она является, либо вовсе к их разрушению.

Объектом исследования настоящей работы является полая цилиндрическая панель, состоящая из двух семейств густо расположенных ребер одного материала под действием нормальной распределенной нагрузки вида $q_0 \sin(\omega_p t)$, где q_0 - интенсивность и ω_p - частота нагрузки. Для учета масштабных эффектов математическая модель колебаний изучаемой механической системы строится на основании микрополярной (несимметричной моментной) теории со стесненным вращением частиц [1-3]. Геометрическая нелинейность учитывается по теории Т. фон Кармана. Согласно континуальной модели Г.И. Пшеничнова [4] регулярную систему ребер будем заменять сплошным слоем. Вследствие этого, напряжения, возникающие в эквивалентной гладкой

¹ Работа поддержана РФФИ, проект № 18-01-00351А

панели, связанные с напряжениями в ребрах, составляющих углы φ_j с осью абсцисс, будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sum_{j=1}^2 \frac{\sigma_x^j \delta_j \cos^2 \varphi_j}{a_j}, \quad \sigma_{yy} = \sum_{j=1}^2 \frac{\sigma_y^j \delta_j \sin^2 \varphi_j}{a_j}, \quad \sigma_{xy} = \sum_{j=1}^2 \frac{\sigma_{xy}^j \delta_j \cos \varphi_j \sin \varphi_j}{a_j}, \\ m_{xx} &= \sum_{j=1}^2 \frac{m_x^j \delta_j \cos^2 \varphi_j}{a_j}, \quad m_{yy} = \sum_{j=1}^2 \frac{m_y^j \delta_j \sin^2 \varphi_j}{a_j}, \quad m_{xy} = \sum_{j=1}^2 \frac{m_{xy}^j \delta_j \cos \varphi_j \sin \varphi_j}{a_j}, \\ m_{xz} &= \sum_{j=1}^2 \frac{m_{xz}^j \delta_j \cos \varphi_j}{a_j}, \quad m_{yz} = \sum_{j=1}^2 \frac{m_{yz}^j \delta_j \sin \varphi_j}{a_j},\end{aligned}\quad (1)$$

где a_j - расстояние между ребрами j -ого семейства, δ_j - толщина ребер j -ого семейства, φ_j - угол между осью OX и осью ребер j -ого семейства, σ_{ij} и m_{ij} - компоненты тензора напряжений и тензора моментных напряжений гладкой панели, напряжения с индексом j относятся к стержням. Физические соотношения для сетчатой панели определяются на основании метода множителей Лагранжа:

$$\begin{aligned}\sigma_x^j &= \sigma_{xx} \cos^2 \varphi_j + \sigma_{yy} \sin^2 \varphi_j + \sigma_{xy} \cos \varphi_j \sin \varphi_j; \quad \tau^j = \sigma_{xz} \cos \varphi_j + \sigma_{yz} \sin \varphi_j; \\ m_x^j &= m_{xx} \cos^2 \varphi_j + m_{yy} \sin^2 \varphi_j + m_{xy} \cos \varphi_j \sin \varphi_j; \quad m_z^j = m_{xz} \cos \varphi_j + m_{yz} \sin \varphi_j.\end{aligned}\quad (2)$$

Для материала пластины определяющие соотношения примем в виде:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} [e_{xx} + \nu e_{yy}], \quad x \rightleftharpoons y, \quad \sigma_{xy} = \frac{E}{(1+\nu)} e_{xy}, \quad (m_{xx}, m_{xy}, m_{xz}) = \frac{El^2}{1+\nu} (\chi_{xx}, \chi_{xy}, \chi_{xz}), \quad (3)$$

где E - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона, l - дополнительный независимый параметр длинны, связанный с тензором изгиба-кручения χ . Компоненты тензора деформаций e_{ij} с учетом кинематических гипотез Кирхгофа-Лява будут иметь вид:

$$\begin{aligned}e_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - k_y w - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \\ e_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.\end{aligned}\quad (4)$$

Компоненты тензора изгиба кручения χ_{ij} , в предположении, что поля перемещений и вращений не являются независимыми, запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}\chi_{xx} &= \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad \chi_{yy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x}; \quad \chi_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \quad \chi_{xz} = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right); \\ \chi_{yz} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right).\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь w - прогиб, u, v - осевые смещения срединной поверхности пластины в направлениях x, y соответственно, k_y - параметр кривизны панели.

Уравнения равновесия, граничные и начальные условия для гладкой оболочки получены из энергетического принципа Остроградского - Гамильтона. Подставляя в них выражения (1-2) с учетом (3-5), а также, полагая $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, $a_1 = a_2 = a$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ$, получим уравнения для микрополярной пологой цилиндрической панели, состоящей из двух одинаковых взаимно перпендикулярных семейств ребер (6). Система приведена к безразмерному виду стандартным образом [5].

$$\begin{aligned}
& 2(\nu-1)\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2(3+\nu)\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - 4(\nu+1)\frac{b^2}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 4k_y(\nu+1)\frac{b}{h}\frac{\partial w}{\partial x} + 4(\nu-1)\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\frac{\partial w}{\partial x} - \\
& - 8\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - 4(1+\nu)\frac{b^2}{c^2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \\
& + l^2(\nu-1)\left(-\frac{h^2}{b^2}\frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + \frac{h^2}{b^2}\frac{\partial^4 v}{\partial x \partial y^3} - \frac{h^2}{c^2}\frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{h^2}{c^2}\frac{\partial^4 v}{\partial x^3 \partial y}\right) = \frac{8h^2 a(\nu^2-1)}{c^2 \delta}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\
& - 4k_y(1+\nu)\frac{c^2}{bh}\frac{\partial w}{\partial y} - 4(1+\nu)\frac{c^2}{b^2}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - 2(3+\nu)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - 2(1-\nu)\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - 4(1+\nu)\frac{c^2}{b^2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \\
& - 8\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} + 4(\nu-1)\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + l^2(\nu-1)\left(\frac{h^2}{b^2}\frac{\partial^4 u}{\partial x \partial y^3} - \frac{h^2}{b^2}\frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{h^2}{c^2}\frac{\partial^4 u}{\partial x^3 \partial y} - \frac{h^2}{c^2}\frac{\partial^4 v}{\partial x^4}\right) = \\
& = \frac{h^2 8a(\nu^2-1)}{b^2 \delta}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\
& ([1+\nu] + 6l^2[1-\nu])\frac{c^2}{bh}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 4(1+l^2[\nu-1])\frac{c^2}{b^2}\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + ([1+\nu] + 6l^2[1-\nu])\frac{b^2}{c^2}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \\
& + 12k_y^2(1+\nu)\frac{c^2}{b^2}w + 12k_y(1+\nu)\frac{c^2}{bh}\frac{\partial v}{\partial y} + 12k_y(1+\nu)\frac{b^2}{h^2}\frac{\partial u}{\partial x} - 6k_y(1+\nu)\frac{c^2}{bh}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 - \\
& - 12(1+\nu)\frac{c^2}{b^2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - 12k_y(1+\nu)\frac{c^2}{bh}w\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 12(1+\nu)\frac{c^2}{b^2}\frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 18(1+\nu)\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \\
& - 12(\nu+1)\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\frac{\partial u}{\partial x} + 12(\nu-1)\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\frac{\partial w}{\partial x} - 6k_y(\nu+1)\frac{b}{h}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + 6(-5+3\nu)\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 - \\
& - 24\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - 24\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + 24(\nu-1)\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 24(\nu-1)\frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 24(3\nu-5)\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \\
& - 12(1+\nu)\frac{b^2}{c^2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 12(\nu-1)\frac{b}{c}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - 12k_y(\nu+1)\frac{b}{h}w\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 12(\nu+1)\frac{c^2}{b^2}\frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \\
& + 6(3\nu-5)\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 12(1+\nu)\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 18(1+\nu)\frac{b^2}{c^2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{24a(\nu^2-1)}{\delta}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varepsilon\frac{\partial w}{\partial t} - q\right]
\end{aligned} \tag{6}$$

Здесь c, b - линейные размеры панели по x и y , соответственно, ε - коэффициент диссипации среды. К уравнениям присоединяем нулевые начальные условия и граничные условия жесткого закрепления торцов панели.

В силу сложности дифференциальной задачи, описывающей нелинейную динамику сетчатых цилиндрических панелей, найти ее аналитическое точное решение не представляется возможным. Единственным выходом является решение таких задач численными методами. Но тогда встает вопрос о достоверности получаемых решений. Для обоснования достоверности получаемых результатов, численная реализация в задачах исследования колебательных режимов нелинейных микрополярных сетчатых цилиндрических панелей в данной работе велась принципиально разными численными методами. Для сведения дифференциальной задачи в частных производных к обыкновенной дифференциальной задаче по пространственным переменным использовались методы Бубнова-Галеркина в высших приближениях, конечных разностей с аппроксимацией второго порядка. Задача Коши также решалась несколькими методами: Рунге-Кутты 4-го, 2-го порядков, методом Рунге-Кутта-Фелберга 4-го порядка, метод Кеш-Карпа 4-го порядка, Рунге-Кутта Принса - Дорманда восьмого порядка, неявный метод Рунге-Кутта 2-го порядка и 4-го порядка, а также методом Ньюмарка. Явный метод характерен тем, что матрица коэффициентов имеет нижний треугольный вид (включая и

нулевую главную диагональ) — в отличие от неявного метода, где матрица имеет произвольный вид. Методы РК Фелберга, Кеш-Карпа, РКПринса - Дорманда предусматривают автоматическое изменение шага, а также возможность контроля погрешности интегрирования. Для каждой комбинации методов строился сценарий перехода колебаний рассматриваемой цилиндрической панели в хаос, где управляющим параметром была интенсивность внешней нормальной распределенной нагрузки q_0 . Для этого для каждого из фиксированных значений q_0 строились сигналы, фазовые портреты 2D и 3D, спектры мощности Фурье, вейвлеты Морле, сечение и отображения Пуанкаре.

При следующих параметрах эксперимента: $\omega_p = 5$, $l = 0.5$, $\nu = 0.3$, $a = \delta = h = 0.002$, $\varepsilon = 1$, $k_y = 12$, $c = b = 1$, $q_0 \in [0; 200]$, $t \in [0; 512]$ для всех рассматриваемых комбинаций численных методов был получен сценарий Рюэля-Такенса-Ньюхауза, то есть переход к хаотическим колебаниям осуществлялся через две независимые частоты и их линейные комбинации. Проводилось исследование сходимости различных численных методов для сведения системы уравнений в частных производных к задаче Коши для поставленной задачи. Выявлено, что метод конечных разностей для хаотического сигнала сходится при 32-х точках разбиения (32x32), метод Бубнова-Галеркина при числе членов ряда $N = 11$. Метод Бубнова-Галеркина требует в два раза меньше машинного времени, однако возникают сложности при выборе аппроксимирующей системы функций, удовлетворяющей граничным условиям. Метод конечных разностей позволяет рассматривать большее разнообразие граничных условий. По результатам численного эксперимента для решения задачи Коши из всех рассмотренных методов был выбран метод Ньюмарка. Решения, полученные методами Рунге-Кутты выше четвертого порядка точности и методом Ньюмарка совпадают, однако последний требует существенно меньше машинного времени.

Работа поддержана РФФИ, проект № 18-01-00351А

Литература

1. Sarkisjan S.O. Micropolar theory of thin rods, plates and shells .Proceedings National Academy of Sciences of Armenia.Mechanics – Izvestiya N NArmenii.Mekhanika, 2005, Vol. 58, No. 2, P. 84–95.
2. Крылова Е.Ю., Папкова И.В., Яковлева Т.В., Крысько В.А. Теория колебаний углеродных нанотрубок как гибких микрополярных сетчатых цилиндрических оболочек с учетом сдвига // Изв. Саратов. ун-та. Нов.сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2019. Т. 19. вып. 3. С. 305–316. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2019-19-3-305-316>
3. Krylova E.Yu., Papkova I.V., Sinichkina A.O., Yakovleva T.V., Krysko-yang V.A. Mathematical model of flexible dimension-dependent mesh plates IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1210 (2019) 012073 doi:10.1088/1742-6596/1210/1/012073
4. Пшеничнов Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука, 1982. 352 с.
5. Крылова Е.Ю., Папкова И.В., Салтыкова О.А., Синичкина А.О., Крысько В.А. Математическая модель колебаний размерно-зависимых цилиндрических оболочек сетчатой структуры с учетом гипотез Кирхгофа-Лява. Нелинейный мир. 2018. Т. 16. № 4. С. 17-28.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ¹

REALIZATION EFFECTS OF POSTCRITICAL DEFORMATION THE REGULARITIES FOR GFRP IN TENSILE TESTS

Лобанов Д.С. – к.т.н., старший научный сотрудник, Староверов О.А. – аспирант, научный сотрудник, Третьяков М.П. – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр экспериментальной механики
e-mail: cem_staroverov@mail.ru

Abstract. Experimental data on mechanical behavior of polymer composite material on the postcritical deformation stage were presented. The typical dependences effect of deformation rate and temperature in a wide range (high and low) on the regularities of deformation and the realization degree of postcritical deformation stage on tensile test were obtained.

Key words: experimental mechanics, GFRP, deformation rate, temperature tests, tensile tests, postcritical deformation.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований механического поведения полимерного композиционного материала на закритической стадии деформирования. Установлены характерные зависимости влияния скоростей деформирования и температур в широком диапазоне на закономерности деформирования и степень реализации закритической стадии деформирования при испытаниях на растяжение.

Ключевые слова: экспериментальная механика, стеклопластик, скорость деформирования, температурные испытания, испытания на растяжение, закритическая стадия деформирования.

Введение

Переход на новые конструкционные материалы (полимерные композиты) взамен классическим в последние годы приобретают массовый характер в промышленности и машиностроении, в частности при проектировании ответственных конструкций авиационного, космического и энергетического назначения, и технических объектов в строительстве. При внедрении композиционных материалов особое значение приобретают вопросы анализа условий разрушения и живучести, надежности и оценки катастрофичности разрушения композитных изделий. Из анализа литературы следует, что закритической стадии деформирования полимерных композиционных материалов различных классов уделяется недостаточное внимание, ниспадающую ветвь диаграммы деформирования не рассматривают как источник информации о поведении материалов, а зачастую отбрасывают при представлении экспериментальных данных и, как следствие, не учитывают при проектировании и оценке безопасности конструкций. Тем не менее, информация о наличии и условиях реализации закритической стадии деформирования полимерных композитов представляется необходимой для уточненной оценки запаса несущей способности и прогнозирования живучести композитных силовых элементов, и может быть использована при проектировании и оценке безопасности конструкций [1-4].

Целью работы было экспериментальное изучение особенностей поведения конструкционного стеклопластика на закритической стадии деформирования при растяжении в условиях различных скоростей нагружения и широкого диапазона температур.

¹ Работа поддержана РНФ, проект № 16-19-00069

Объектами исследования являлись образцы конструкционного стеклопластика на основе препрега ВПС-48 и эпоксидного связующего с различными схемами укладки слоев, изготовленные по серийной технологии автоклавным формованием.

Методики испытаний и оборудование

Испытания на растяжение проводились на базе Центра коллективного пользования «Центр экспериментальной механики» Пермского Национального исследовательского политехнического университета (ЦКП ЦЭМ ПНИПУ) на сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 с использованием навесного экстензометра Instron 2620-601 с погрешностью измерения деформаций не более 0.15 % и на электромеханической системе Instron 5882 в состав которой входит бесконтактный видеоэкстензометр и температурная камера с рабочим диапазоном температур от -100° до +350° С [5].

Программа исследований на растяжение приведена в таблице 1. Перед тем, как приступить к выполнению программы были проведены предварительные испытания образцов стеклопластика с разной базовой длиной рабочей зоны. Целью предварительных испытаний был выбор геометрических параметров образцов, при которых реализация закритической стадии деформирования была более ярко выражена. За основу были взяты стандартные образцы в виде двусторонней лопатки с длиной рабочей зоны $l_0=75\text{мм}$ и шириной $h=18\text{мм}$. Также были испытаны образцы с длиной рабочей зоны $l_0/2$ и $l_0/4$.

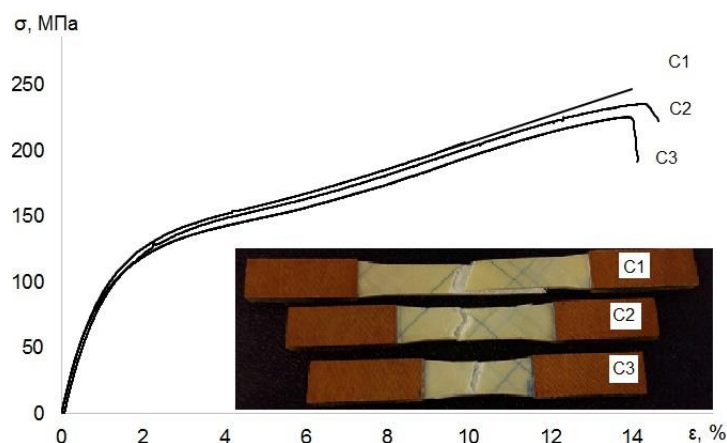


Рис.1. Вид разрушения и диаграммы деформирования образцов стеклопластика со схемой укладки слоев $[\pm 45^\circ]$ с разной длиной рабочей зоны: C1-75мм; C2-37,5мм; C3-18,75мм

Таблица 1. Программа исследования

№	Название этапа	Условия испытаний
1	Деформирование и разрушение стеклопластика при различных скоростях нагружения	Температура: 22 °С; Скорость нагружения: 0,1 мм/мин; 1 мм/мин; 10 мм/мин;
2	Влияние температуры на поведение стеклопластика на закритической стадии деформирования	Температура: -40 °С, 0 °С, 22 °С, 120 °С, 200 °С; Скорость нагружения: 1мм/мин;
3	Оценка совместного влияния жесткости, скоростей нагружения и температур на реализацию закритической стадии деформирования	Температура: 22 °С, 120 °С, 200 °С; Скорость нагружения: 0,1 мм/мин; 1 мм/мин;

На рисунке 1 приведены вид разрушения и диаграммы деформирования образцов стеклопластика с разными длинами рабочей зоны (75мм, 37,5мм и 18,75мм) при одной скорости деформирования равной 1 %/мин. Все образцы разрушались в рабочей зоне. Исходя из результатов предварительных испытаний выбраны размеры рабочей части образца, при испытании которых наблюдается реализация закритической стадии

деформирования. Отличие в степени реализации закритической стадии деформирования при растяжении образцов различной длины связано с изменением жесткости нагружающей системы по отношению к зоне разрушения [6]. Использование коротких образцов позволяет минимизировать длину частей образца, которые упруго деформируются в процессе нагружения. Далее все испытания проводились на образцах типа СЗ с длиной рабочей зоны $l_0=18,75$ мм.

Результаты испытаний и обсуждение

Результаты исследований полученные при реализации программы испытаний приведены на рисунках 2 и 3 в виде диаграмм деформирования в осях «напряжение-деформация», где напряжения вычислялись как отношение прикладываемой нагрузки к начальной площади поперечного сечения образца.

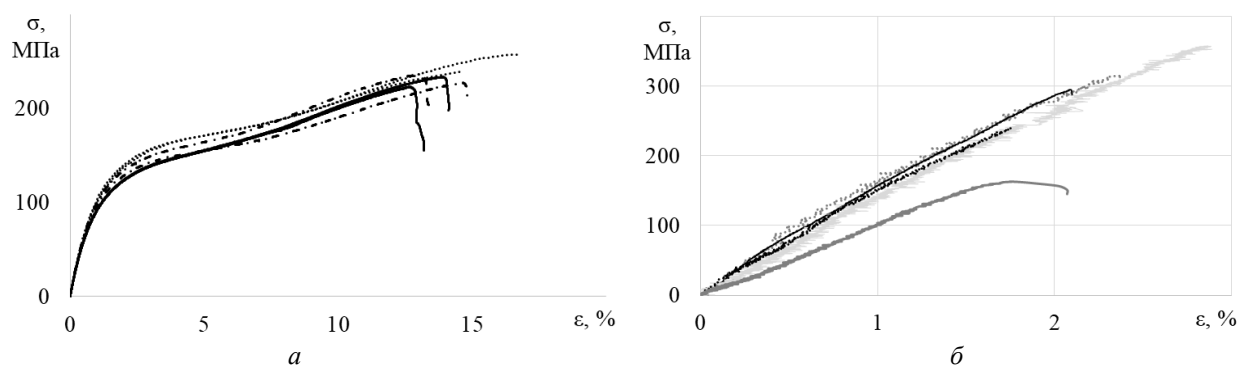


Рис. 2. Типовые диаграммы деформирования образцов стеклопластика с укладкой $[\pm 45^\circ]$ при разных скоростях растяжения: 0.1 мм/мин – сплошные линии, 1 мм/мин – штрихпунктирные линии, 10 мм/мин – пунктирные линии (а) и образцов стеклопластика с укладкой $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ]$ при температурах: -40°C – светло серая сплошная линия; 0°C – серая пунктирная линия; 22°C – черная сплошная линия; 120°C – черная пунктирная линия; 200°C – серая сплошная линия)

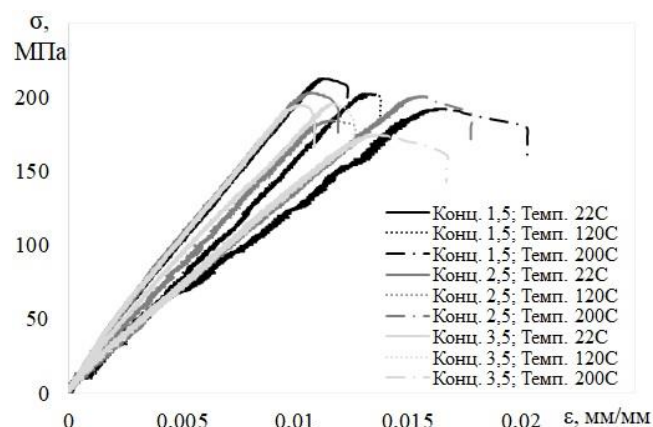


Рис. 3. Типовые диаграммы деформирования образцов стеклопластика со схемой укладки $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ]$ с концентраторами (1,5, 2,5, 3,5 мм) при температурах 22°C , 120°C и 200°C и скорости нагружения 1 мм/мин

Увеличению скорости деформирования приводит к известному повышению упругих и прочностных характеристик рассмотренного композиционного материала, но при этом снижается степень реализации закритической стадии деформирования, а при скорости 20 мм/мин и выше реализации закритической стадии не наблюдалось. По результатам испытаний на растяжение в широком диапазоне температур (-40°C , 0°C , 22°C , 120°C , 200°C) отмечено, что понижение температуры приводит к увеличению упругих и прочностных характеристик композита. Реализация закритической стадии проявляется незначительно, при этом можно отметить повышение степени реализации ниспадающего участка диаграмм деформирования при температуре 200°C и выше. Качественно схожие результаты по влиянию повышенных и пониженных температур на изменение

механических свойств и реализации закритической стадии деформирования были получены авторами на других конструкционных стеклопластиках [7-9].

При оценке совместного влияния жесткости, скоростей нагружения и температур на реализацию закритической стадии деформирования (на образцах с концентратором) отмечается, что при температурах 22 °С и 120 °С для всех групп образцов стеклопластика и всех скоростей нагружения степень реализации закритической стадии деформирования примерно одинаковая. При температуре испытания 200 °С для всех групп образцов при скорости нагружения 0,1мм/мин наблюдается значительное увеличение степени реализации закритической стадии деформирования. Протяженность ниспадающих участков по оси деформации составляет от всей диаграммы деформирования для образцов с концентраторами 1,5 мм, 2,5 мм и 3,5 мм в среднем 17 %, 11 % и 18 % соответственно, в то время как, при 22 °С и 120 °С ниспадающий участок для всех групп образцов не превышает 5-7 % от диаграммы деформирования.

Заключение

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлены характерные зависимости влияния скорости деформирования различием на два порядка, широкого диапазона температур и жесткости на закономерности поведения исследуемого конструкционного стеклопластика и степень реализации закритической стадии деформирования при испытаниях на растяжение.

Работа поддержана РФФ, проект № 16-19-00069

Литература

1. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов: моногр. / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова, Д.С. Лобанов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 156 с. ISBN 978-5-398-02104-2
2. Tretyakov, M.P., Wildemann, V.E., Lomakin, E.V. Failure of materials on the postcritical deformation stage at different types of the stress-strain state. – Procedia Structural Integrity. – Vol.2 – 2016. pp. 3721-3726
3. Tretyakov M.P., Lobanov D.S., Wildemann V.E. Study of the regularities of postcritical behavior and failure of specimens in the tests of composite materials // Procedia Structural Integrity. – Vol. 17. –2019. pp. 865–871.
4. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1997. 288 с.
5. Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. ... канд. техн. наук. -Пермь, 2015. -148с.
6. Wildemann V.E., Tretyakov M.P. Analysis of the effect of loading system rigidity on postcritical material strain // Journal of Machinery Manufacture and Reliability — 2013. — Vol. 42, Issue 3. — pp. 219-226.
7. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Experimental studies of the high temperature influence on strength and deformation properties of combined glass organoplastics // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2017. - №1. – pp. 104-117.
8. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 4. — С.33-41
9. Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu. Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave// Mechanics of Composite Materials, — 2018 — Vol. 54 — No. 5 — pp. 655-664.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ МЕЖСЛОЕВОМ СДВИГЕ¹

TEMPERATURE AGING EFFECTS ON MECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURAL GFRP ON INTERLAMINAR SHEAR TESTS

Лобанов Д.С. – к.т.н., старший научный сотрудник

Зубова Е.М. – аспирант, инженер-исследователь,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр экспериментальной механики

e-mail: cem.zubova@mail.ru

Abstract. New experimental data of temperature effects GFRP mechanical behavior on interlaminar shear were obtained. Regularities of GFRP mechanical properties degradation after temperature aging on interlaminar shear tests, were analyzed with complex used testing system and system of registration acoustic emission signals AMSY-6.

Key words: interlaminar shear, short-beam test, temperature regularities, acoustic emission, temperature aging, GFRP.

Аннотация. Получены новые экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние температур на механическое поведение образцов конструкционного стеклопластика при межслойном сдвиге. Проанализированы закономерности изменения свойств стеклопластика после температурного старения при межслойном сдвиге на базе совместного использования испытательных систем системы регистрации сигналов акустической эмиссии AMSY-6

Ключевые слова: межслойный сдвиг, испытания короткой балки, температурные зависимости, акустическая эмиссия, температурное старение, стеклопластик.

Исследование и анализ влияния повышенных и пониженных (эксплуатационных) температур на механические свойства и механизмы разрушения композиционных материалов является актуальным направлением исследований [1-2]. Одна из важных задач – это установление температурных зависимостей упругих и прочностных свойств полимерных композитов, применяемых в ответственных конструкциях [3-4]. Большое внимание уделяется изучению процессов связанных с деградацией механических свойств конструкционных композитов при температурном старении [5]. В качестве дополнительного метода диагностики материалов, подвергшихся предварительному температурному старению, и оценки их структурной целостности применяется метод акустической эмиссии (АЭ) [5].

В работе проведена серия механических испытаний на межслойный сдвиг образцов стеклотекстолита на основе препрега ВПС-48 и эпоксидного связующего, при нормальных и повышенных температурах 22°, 120°, 160°, 200°C и после предварительного температурного старения при аналогичных температурных режимах. Цель работы заключается в получении новых экспериментальных данных об изменении механических свойств конструкционного стеклопластика при предварительном и прямом воздействии повышенных (эксплуатационных) температур в условиях межслойного сдвига.

Все испытания проводились на базе Центра коллективного пользования «Центр экспериментальной механики» Пермского Национального исследовательского политехнического университета. Механические испытания на межслойный сдвиг по методу изгиба короткой балки при нормальной температуре проводились с учетом рекомендаций ГОСТ 32659-2014 на электромеханической системе Instron 5965, при

¹ Работа поддержана РФФИ, проект № 18-79-00209

повышенных температурах на системе Instron 5882 в состав которой входит температурная камера с рабочим диапазоном температур от -100 до +350°C. Скорость нагружения для испытаний всех групп образцов составляла 1 мм/мин.

Предварительное температурное старение не нагруженных образцов стеклопластика осуществлялось согласно режимам, представленным в таблице 1 в температурной камере. После температурного старения группы образцов испытывались при нормальной температуре.

Таблица 1. Режимы температурного старения

Температура выдержки, °C	Без старения	120	120	200	200
Количество суток	–	5	15	5	15
Количество образцов, шт	По 5 для каждой группы				

Испытания образцов, после предварительного температурного старения, проводились совместно с использованием системы для регистрации сигналов АЭ AMSY-6 от начала испытания до полного разрушения образца. Использовались широкополосные пьезоэлектрические датчики М31 (частотный диапазон 300-800 кГц) и усилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Датчики крепились на образцы с помощью клея. Фото образца в оснастке с датчиком АЭ представлено на рисунке 1.

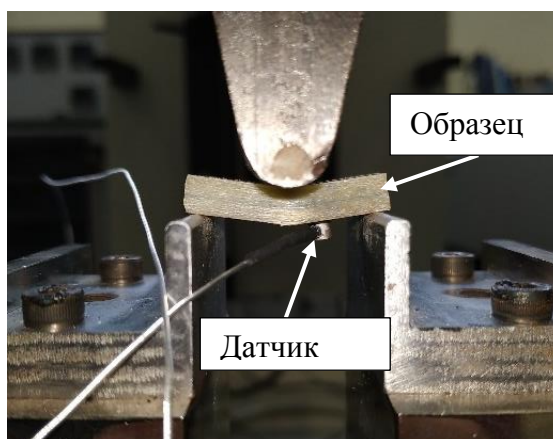


Рис.1. Фото образца в специальной оснастке с датчиком АЭ

Результаты испытаний на межслоевой сдвиг при различных температурах в виде диаграмм нагружения и виды разрушений образцов представлены на рисунке 2. Отмечается, что при испытаниях при нормальной и повышенной температуре 120 °C образцы разрушались по механизму «растяжение» (по классификации механизмов разрушения из ГОСТ 32659-2014); при повышенной температуре испытания 160 °C образцы разрушались по механизмам «одиночный сдвиг» и «множественный сдвиг». При температуре испытания 200 °C образцы разрушались по механизму «пластичный сдвиг». Испытания при температуре 22 °C проводились совместно с регистрацией сигналов АЭ.

При повышении температуры до 120 °C происходит снижение значений прочности при межслоевом сдвиге на 36%, при температуре 160 °C снижение составляет 57%, а при 200 °C – 90%.

По полученным экспериментальным данным образцов стеклопластиков, после предварительного температурного старения построены диаграммы нагружения для образцов всех режимов (рис. 3, а). Фото образцов после разрушения представлено на рис. 3, б.

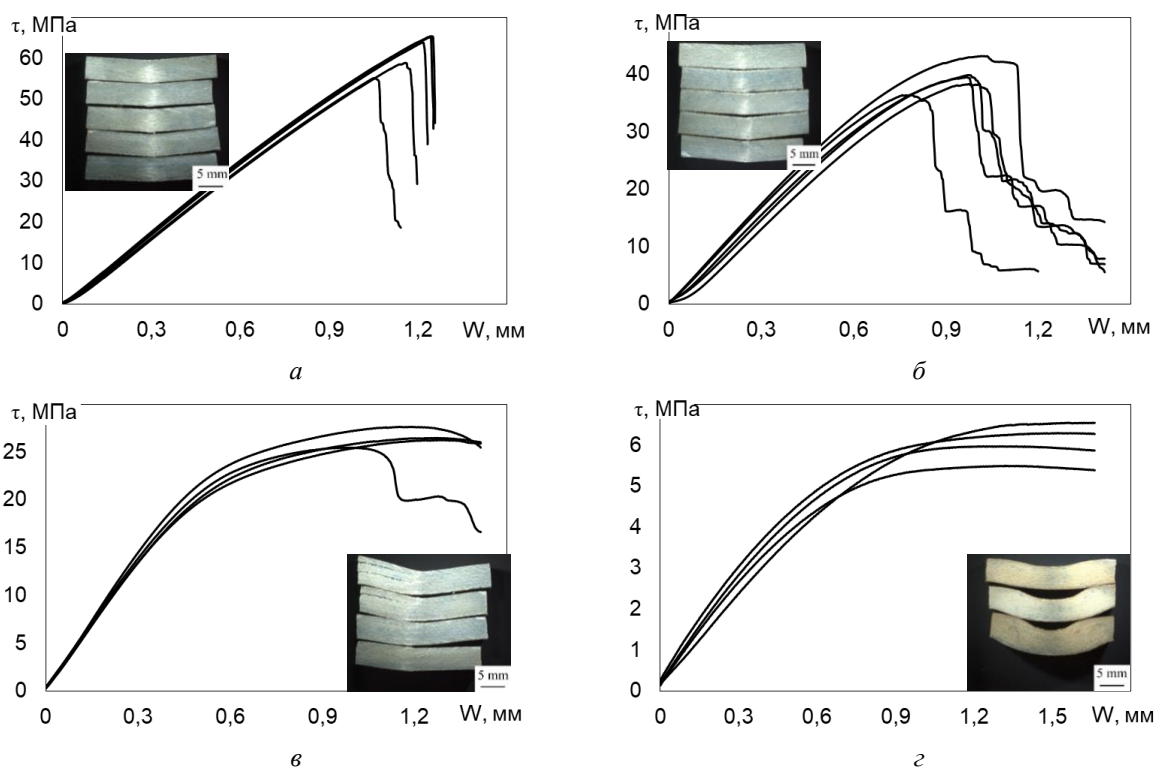


Рис.2. Диаграммы нагружения образцов стеклопластика ВПС-48 при испытаниях на межслоевой сдвиг (метод изгиба короткой балки) в условиях нормальной и повышенных температур: (а) – 22 °; (б) – 120 °; (в) – 160 °; (г) – 200 °С

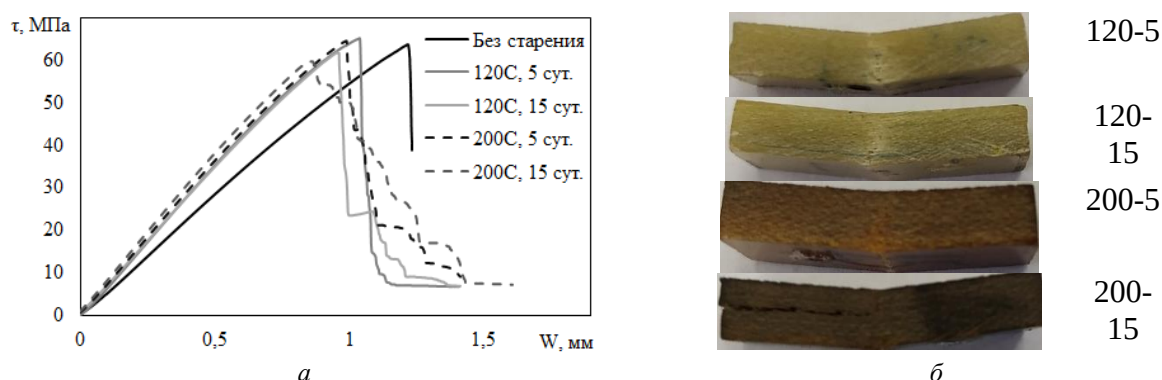


Рис.3. Характерные диаграммы нагружения образцов стеклопластика ВПС-48 при испытаниях на межслоевой сдвиг после предварительного температурного старения (а), фото образцов после разрушения (б)

По диаграммам нагружений (рис.3.а) групп образцов стеклопластика после температурного старения при разных режимах можно отметить монотонное (от менее высокотемпературных и продолжительных режимов к более) увеличение жесткости после старения. Для режимов 120-5 и 120-15 это объясняется деполимеризацией связующего. Цвет образцов становится более насыщенно желтым. Для режимов 200-5 и 200-15 этот эффект можно объяснить низкотемпературной карбонизацией полимера на воздухе, цвет становится коричневым и темно коричневым соответственно.

Для образцов после старения при режиме 200-15 происходит смена механизма разрушения (рис. 3.б). Образцы разрушаются от межслойного расслоения. Снижение максимальных касательных напряжений для образцов после старения при режимах 120-5, 120-15 и 200-5 относительно образцов, испытанных без старения, не происходило, разница в значениях попадает в статистический разброс.

В данной работе в качестве информативного параметра сигналов АЭ использовалось значение частоты спектрального максимума (ЧСМ, кГц) [6, 7]. Значения ЧСМ были извлечены с помощью специального программного модуля при помощи

алгоритма быстрого преобразования Фурье.

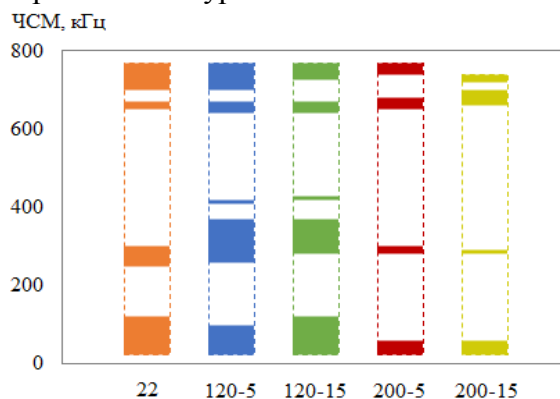


Рис. 4. Распределение диапазонов ЧСМ для образцов при различных уровнях старения

На рисунке 4 представлено распределение характерных диапазонов частот, полученных после разрушения образцов с различными уровнями предварительного температурного старения. Отмечается изменение в распределении диапазонов частот в зависимости от температуры старения. Это связано с изменением свойств связующего и механизмов накопления повреждений в зависимости от режима температурного старения.

Таким образом, получены новые экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние повышенных (эксплуатационных) температур в условиях межслоевого сдвига на образцы конструкционного стеклопластика. Отмечается смена механизмов разрушения в зависимости от режима температурного старения, что подтверждается при анализе сигналов акустической эмиссии.

Работа поддержана РНФ, проект № 18-79-00209

Литература

1. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 4. — С.33-41
2. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Experimental studies of the high temperature influence on strength and deformation properties of combined glass organoplastics // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2017. - №1. – pp. 104-117.
3. Lobanov D.S., Slovikov S.V. Mechanical behavior of a unidirectional basalt-fiber-reinforced plastic under thermomechanical loadings // Mechanics of Composite Materials, — 2018 — Vol. 54 — No. 3 — pp. 351-358
4. Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. ... канд. техн. наук. -Пермь, 2015. -148с.
5. Lobanov D. S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // Procedia Structural Integrity. – Vol. – 18. – 2019, pp. 347-352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.174>
6. Zubova E.M., Lobanov D.S., Strungar E.M., Wildemann V.E., Lyamin Y.B. Application of the acoustic emission technique to studying the damage accumulation in a functional ceramic coating // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2019. – №1, pp. 38-48.
7. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2019. - №1. – pp. 173-183.

ИССЛЕДОВАНИЕ И НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

RESEARCH AND NATURAL MODELING OF AN INERTIAL SYSTEM ON A MOBILE PLATFORM

Лобова А.И.^{1,2} - студент кафедры М7-КФ, Кандаурова К.И.^{1,3} - студент кафедры М7-КФ,
Масюк В.М.^{1,4} – к.ф.-м.н., доцент кафедры, зам. зав. кафедры М7-КФ, Орехов С.Ю.^{1,5} –
ст. преподаватель кафедры М7-КФ,
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана¹
nastia.lobova2012@yandex.ru², kandaurovaksen@yandex.ru³,
masyuk77@mail.ru⁴, serg31057@mail.ru⁵

Abstract. This article is dedicated to the research of inertial sensors application. A number of issues of the measurements organization, the received data calibration and the results interpretation are investigated here. Theoretical researches are compared with the practically obtained data. The explored mobile platform is equipped with inertial sensors and high precision encoder. The mathematical model was constructed, the comparative experiments were carried out. It was concluded that the use of this method is a complement to the data obtained from the encoders.

Key words: automated control, positioning accuracy, inertial systems.

Аннотация. Исследуется применимость инерциальных датчиков для определения ориентации и пройденного пути мобильной платформы. В работе исследуется ряд вопросов организации измерений, калибровки получаемых данных и интерпретации результатов. Теоретические исследования сравниваются с практическими данными, полученными в результате разработки натурной модели мобильной платформы, оснащенной инерциальными датчиками и высокоточными энкодерами для сравнения результатов. Построена математическая модель и проведены сравнительные эксперименты. Сделаны выводы, что использование данного метода оценки положения платформы в некоторых случаях хорошо дополняет данные с энкодеров, описаны случаи, когда указанный подход необходим.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, точность позиционирования, инерциальные системы.

В настоящее время проблема позиционирования и определения положения мобильных платформ является весьма актуальной, поскольку такие платформы широко используются в складских системах, системах доставки грузов и в последнее время становятся массовыми. Данный вопрос решается множеством различных методов [1-4], а инерциальные системы особенно широко описаны и применяются при проектировании летательных аппаратов (например, системы стабилизации квадрокоптеров). Научный интерес представляет исследование возможности использования инерциальных датчиков для наземных платформ. Здесь следует отметить и экономическую составляющую – стоимость энкодеров несоизмеримо выше стоимости инерциальных датчиков.

Первым этапом к решению этой проблемы, является выбор и оценка необходимого оборудования, построение математической модели, а также построение натурной модели. Исследования проводились на следующей аппаратной платформе: датчик гироскопа/акселерометра (MPU 6050/9250); систему GPS\ГЛОНАС; Bluetooth – для передачи данных на ПК; силовой H-мост на МОСФЕТ транзисторах, 2 двигателя постоянного тока; микроконтроллер Arduino Mega 2560 (верхний уровень управления); микроконтроллер Arduino Nano (уровень управления приводной частью), 2 энкодера с разрешением 400 имп/об.

Основные цели разработки платформы: создание системы управления двигателями с плавной регулировкой мощности [5]; обеспечение слежения и контроля за оборотами двигателя; контроль за током и напряжением; регулирование и синхронизация оборотов в реальном времени; обеспечение автономного построения траектории [6] по заданным входным параметрам и ее реализация.

Схема организации электронной подсистемы и габаритный чертеж мобильной платформы приведен на рис. 1.

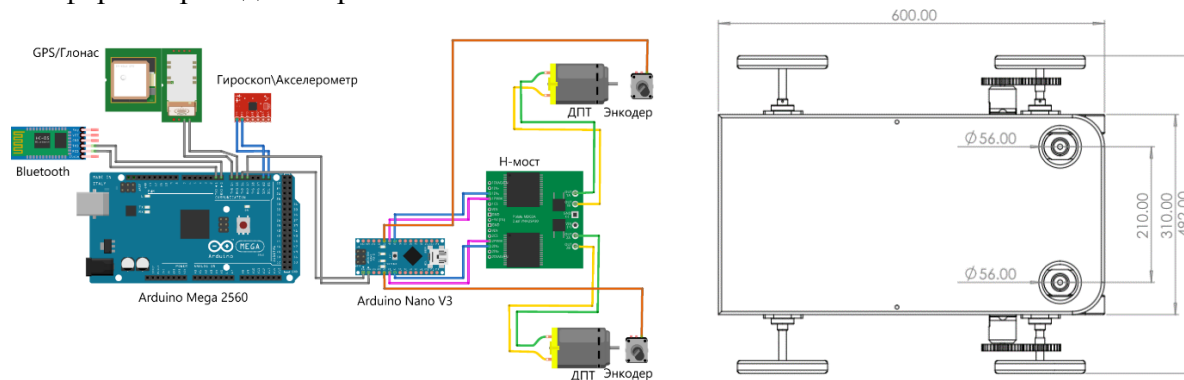


Рис.1. Электронная подсистема и габаритный чертеж мобильной платформы

Для обеспечения корректной работы и исследования инерциальных систем был решен ряд задач: проработан алгоритм совместной работы двух микроконтроллеров, передачи данных по протоколам связи, съем информации с энкодеров и инерциальных датчиков, реализован удобный протокол взаимодействия ПК с микроконтроллером, проработана математическая модели системы из двух двигателей и платформы.

Как показали эксперименты на макете, использование GPS датчиков, как датчиков точного позиционирования (в том числе определения начального положения) является некорректной задачей, т.к. получаемая точность 1-3м в пространстве лаборатории явно недостаточна. В качестве независимого датчика скорости/позиции использовались инкрементальные энкодеры с разрешением (приведенным к диаметру колеса) 0,98 мм/импульс.

Следующим этапом работы была оценка позиционирования методом двойного интегрирования данных акселерометра и оценка собственных шумов, были исследованы несколько датчиков (MPU 6050 и MPU 9250): датчики закреплялись строго параллельно плоскости XOY на основании платформы; частота выборки 200 мс, 30 выборок, 10 экспериментов, 30 выборок соответствует 6с, что по времени соответствует среднему маневру платформы; данные калибровались путем усреднения и учета смещения по предыдущим сериям эксперимента.

Математическая постановка задачи достаточно проста: чтобы получить пройденный путь (пусть по координате x), достаточно дважды проинтегрировать данные акселерометра, т.е.

$$S_x = \int_0^{t_2} \int_0^{t_1} a_x dt_1 dt_2 .$$

Однако при экспериментальном использовании данного выражения был выявлен ряд негативных факторов:

- дискретность отсчетов по времени, что потребовало переходить к схеме численного интегрирования (в исследовании использовался метод трапеций). Проблема накопления ошибки решается сбросом и перекалибровкой датчика после выполнения отрезка траектории,
- вибрационный шум от работающих двигателей, неидеальность конструкции привода, неровностей дороги и других сложно прогнозируемых факторов. Однако можно сделать некоторые предположения, исходя из природы шумов: так как в результате

моделирования мы получили примерные массогабаритные и инерционные параметры мобильной платформы, то можно оценить спектральное распределение шума от работающих приводов, зная примерные характеристики моторов и скорости их вращения.

В результате анализа полученного графика был сделан вывод о необходимости предварительной фильтрации полученных данных. Было рассмотрено три варианта фильтра: по среднему значению, медианный и экспоненциальный. В данном случае было принято, что ошибки, воздействующие на мобильную платформу и на сенсор – акселерометр имеют одну природу и упростили подход, требующий построения фильтра Калмана, сведя его к экспоненциальному:

$$x_{n+1} = K_{ycm} z_{n+1} + (1 - K_{ycm}) x_n.$$

После построения системы был проведен ряд экспериментов и построены профили разгона/торможения мобильной платформы, представленные на рисунке 2. Результаты эксперимента контролировались с помощью энкодеров, погрешность составила порядка 3 - 5% в зависимости от эксперимента. Изучение проблемы использования акселерометров в подобных задачах позволило сделать вывод, что полученное значение погрешности является типовым для данных типов датчиков.

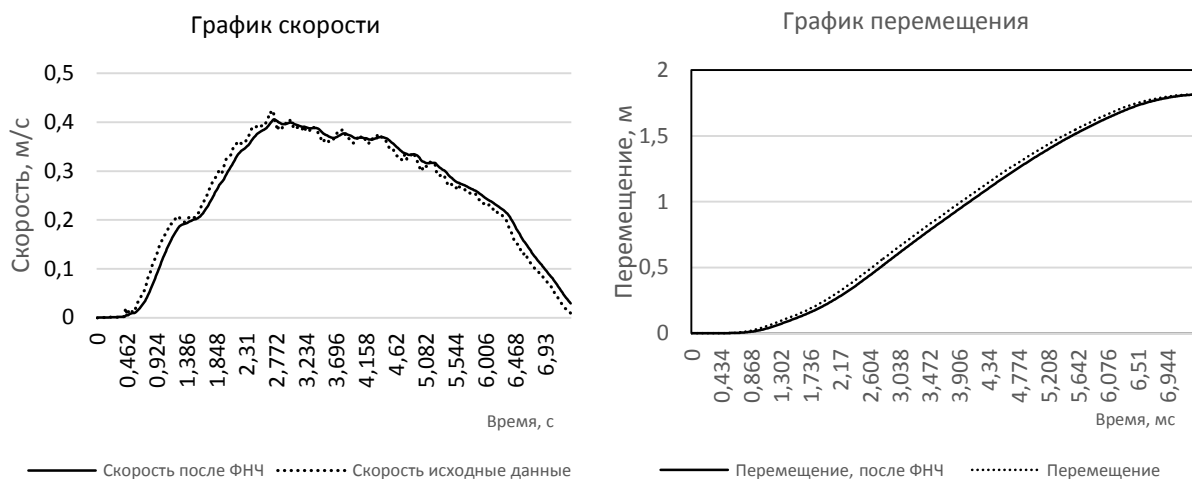


Рис.2. Профиль скорости и пройденного расстояния для мобильной платформы

На следующем этапе работы была построена математическая модель приводов, учтены задержки в микроконтроллере, разработаны регуляторы для реализации индивидуальной стабилизации скорости каждого из двигателей. Такой подход дает удовлетворительный результат (на длине пути в 2000мм за 2с отклонение от прямолинейного пути не превысит 10мм, но разрешающая способность энкодера при диаметре колеса в 125 мм составит примерно 0,98 мм/импульс и возможны пути дальнейшего уточнения). Введем перекрестные связи в регуляторе скорости и оценки скорости двигателей энкодером или позиции мобильной платформы с помощью датчика (гироскопа/акселерометра). Предположим, что имеется возможность оценить увод платформы. Покажем возможность компенсации данного отрицательного эффекта, используя простейший П-регулятор. Результат моделирования представлен на рис. 3. Видно, что теоретически можно получить отклонение менее 1,5 градусов. Точность определяется только точностью измерения угла датчиком инерциальной системы, точностью отработки входного воздействия приводов и механикой мобильной платформы.

В результате реальных экспериментов была подтверждена работоспособность синтезируемого регулятора. Сравнение смоделированных и реальных данных показали расхождение порядка 30%, что можно считать очень хорошим результатом. Серия экспериментов показала перерегулирование по скорости, заметное на старте, но не сказывающееся на отработке траектории.

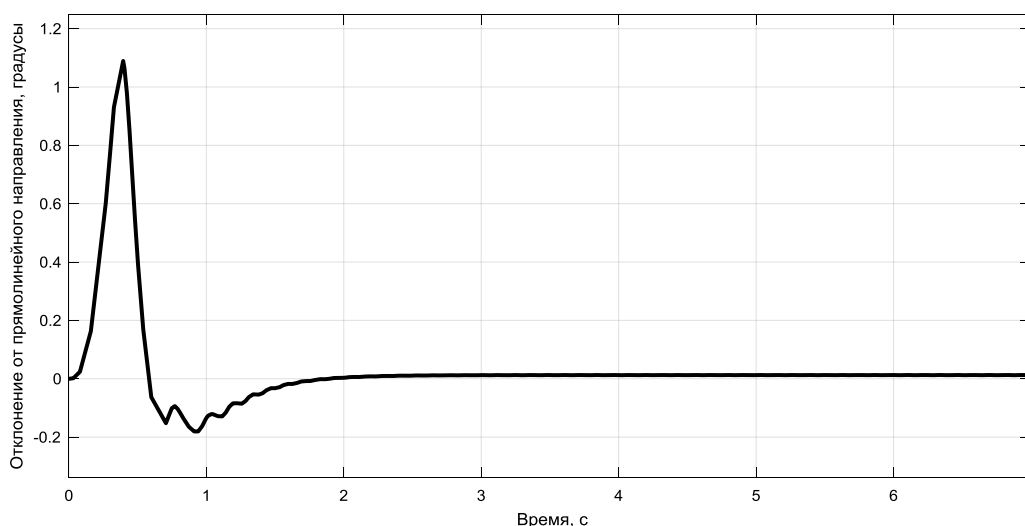


Рис.3. Отклонение мобильной платформы от прямолинейного направления (по модели), градусы

В результате проведенных исследований было сделано несколько важных выводов: инерциальные датчики, в связи с характером их работы на наземной платформе использовать возможно, но менее эффективно, чем в полетных системах. В результате, инерциальные системы на наземных платформах лучше всего использовать в качестве дополнительной системы анализа движения: для расчета динамических характеристик системы, для анализа начального углового положения системы и коррекции траектории; дополнительного пересчета угловой скорости поворота мобильной платформы и, соответственно, оценки траектории движения.

В дальнейшем предполагается использовать несколько датчиков с комплементарным фильтром, доработать конструкцию мобильной платформы, заменить микроконтроллер на более производительный с целью использования более сложных алгоритмов фильтрации и уменьшения задержек при обработке и передаче данных.

Литература

1. Селиванова Л.М., Шевцова Е.В. Инерциальные навигационные системы. Часть 1. Одноканальные инерциальные навигационные системы., учебное пособие., Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана 2012. С.8
2. Использование инерциальной навигационной системы (ИНС) с несколькими датчиками на примере задачи стабилизации высоты квадрокоптера [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/post/137595/> (дата обращения 20.08.2019)
3. Масюк В.М., Похвалитова А.А., Васин П.А., Исследование применимости MEMS-датчиков в мобильных робототехнических системах Печ., РИНЦ В сборнике: Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины сборник научных статей по материалам XII международной научно-технической конференции в 2 частях., 2016., С. 238-244., 6с/2с.
4. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Sebastian O.H. Madgwick. URL: https://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (дата обращения 20.08.2019)
5. Коммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino / У. Коммер. - СПб.: BHV, 2016. - 256 с.
6. John-David Warren, Josh Adams, Harald Molle, Arduino Robotics / LLC., 233 Spring Street, 6th Floor, New York, NY 10013, 2011 year, pp 601.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА¹

STUDYING OF ACCUMULATION DAMAGES REGULARITIES UNDER LOW CYCLE LOADING AND CYCLE VARIABLE PARAMETERS CONDITIONS

Лыкова А.В.¹ – младший научный сотрудник, Ильиных А.В.¹ – к.т.н., доцент

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

sem.lykova@gmail.ru

Abstract. The aim of the work is to study the possibilities of predicting cyclic durability in low-cycle fatigue and variable cycle parameters conditions, which combination describes the change complex nature in the stress-strain state over time of aircraft engine parts, based on linear and nonlinear models of damage accumulation. To do this, low-cycle fatigue tests of cylindrical samples were carried out for various loading forms, consisting of several simple-shape cycles. Based on this model, cyclic durability forecasting for block cyclic loading will be carried out.

Key words: low-cycle fatigue, prediction of life, variable parameters of cycle, damage accumulation.

Аннотация. Цель работы заключается в изучении возможностей прогнозирования числа циклов до разрушения в условиях малоциклового усталости и переменных параметров цикла, комбинация которых описывает сложный характер изменения напряженно-деформированного состояния во времени деталей авиационного двигателя, на основе линейных и нелинейных моделей накопления повреждений. Для этого были проведены испытания на малоцикловую усталость цилиндрических образцов по разным формам нагружения, состоящих из нескольких циклов простой формы. На основе данной модели будет осуществлено прогнозирование циклической долговечности для блочного циклического нагружения.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, прогнозирование долговечности, переменные параметры цикла, накопление повреждений.

Необходимость исследований в области усталости материалов обусловлена разрушением элементов конструкций, длительно функционирующих при нестационарных, как правило, циклических режимах нагружения. Поэтому в настоящее время актуальны задачи прогнозирования долговечности конструкционных сталей авиационного назначения.

Работы И. Баушингера, Л.Ф. Коффина, Л. Берстоу, и других авторов посвящены исследованию механического поведения материалов при циклическом деформировании. Активное развитие получили работы посвященные влиянию на значение усталостной долговечности различных факторов, таких как состояние поверхности образцов, свойств и структуры, наличие концентраторов напряжений, значение средних напряжений. Основные результаты работы по данным направлениям приведены в монографиях Дж. Коллинза, С.В. Серенсена, В.Т. Трощенко, В.П. Багмутова и других. Исследование влияния температуры, напряженно-деформированного состояния на механическое поведение конструкционных сплавов при малоциклового усталости исследовалось в работах [1-4]. Влияние форм и параметров цикла на циклическую долговечность [5,6].

Цель работы заключается в изучении возможностей прогнозирования ресурса в условиях малоциклового усталости и переменных параметров цикла, комбинация которых описывает сложный характер изменения напряженно-деформированного состояния во

¹ Работа поддержана РФФИ, проект № 19-38-90270

времени деталей авиационного двигателя, на основе линейных и нелинейных моделей накопления повреждений.

На рисунке 1 представлена зависимость отношения относительной интенсивности упругих напряжений $\bar{\sigma}_i$ к пределу текучести материала в наиболее нагруженной части ступицы диска, иллюстрирующий сложный характер изменения напряжений в цикле.

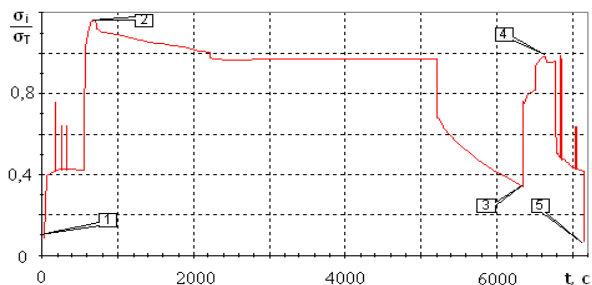


Рис.1. Пример изменения во времени интенсивности напряжений в наиболее нагруженной части ступицы диска (в приближении линейно-упругого материала)

Проведены испытания на малоцикловую усталость цилиндрических образцов из алюминия Д16Т по разным формам нагружения. Выбиралось несколько блоков программного нагружения, которые состояли из разных циклов простой формы. На рисунке 2 приведены формы циклов блочного малоциклового нагружения, которые были выбраны при комбинации форм циклов с постоянными параметрами. В процессе испытания считалось общее количество блоков циклического деформирования до разрушения. Циклическое деформирование сопровождается образованием в координатах напряжение-деформация петли гистерезиса, характеризующей работу упругопластического деформирования за полный цикл нагружения. На рисунке 3 приведены характерные зависимости нормального напряжения от осевой деформации по разным формам цикла зафиксированные в начале, в середине и в конце (перед разрушением) испытания. В таблице 1 приведены результаты испытаний при малоцикловом нагружении при переменных параметрах цикла по блочным схемам.

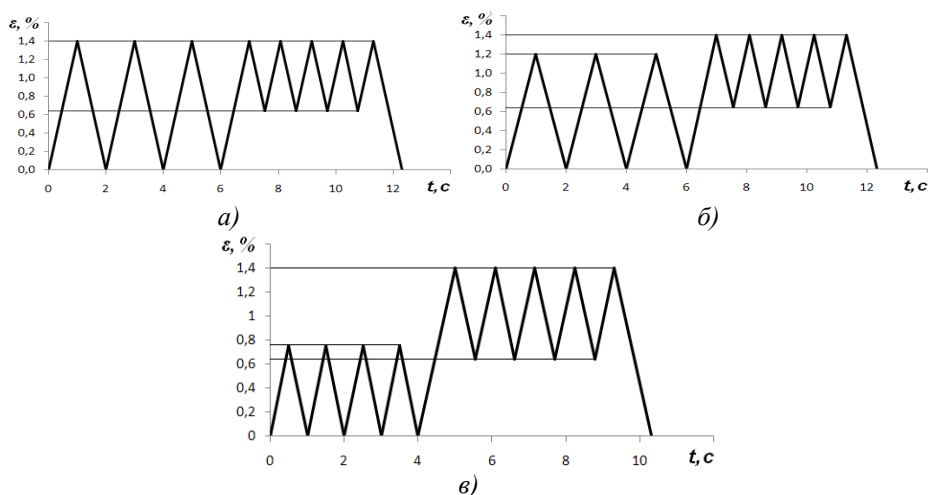


Рис.2. Схемы видов блочного циклического нагружения с переменными параметрами:
а – блок №1, б – блок №2, в – блок №3

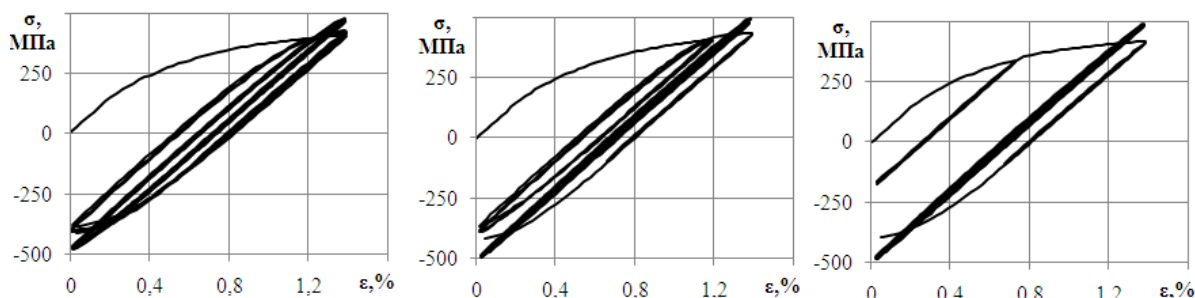


Рис.3. Характерные зависимости нормального напряжения от осевой деформации по разным формам цикла

Таблица 1. Результаты испытаний цилиндрических образцов из алюминия Д16Т при малоцикловом нагружении по блочным схемам

№ блока	Максимальная деформация в блоке, ε_{max} , %	Минимальная деформация в блоке, ε_{min} , %	Размах деформации в блоке, ε_p , %	Коэффициент асимметрии R	Среднее число циклов до разрушения, N
1 блок	1,38	0,01	1,37	0,007	120
2 блок	1,38	0,02	1,36	0,014	468
3 блок	1,38	0,02	1,36	0,007	630

В результате получены экспериментальные данные малоциклового усталости со сложными параметрами цикла сплава алюминия Д16Т, проведен анализ закономерностей процессов накопления повреждений на основе модели линейного суммирования повреждений [6].

Для оценки степени поврежденности материала при малоциклового усталости в условиях действия переменных амплитуд одноосного или двухосного циклического нагружения используются различные модели накопления повреждений. Так как предварительный анализ линейной суммировании повреждений дает существенное отклонение результатов прогнозирования от результатов экспериментальных исследований, то целесообразным является использование нелинейных моделей накопления повреждений.

Первой нелинейной гипотезой накопления повреждений является гипотеза, предложенная Марко и Старки [8].

Вычисление суммарной поврежденности осуществляется с учетом повреждений, накопленных на предыдущих этапах [7]:

$$\sum_{k=1}^i D_k = \left[\frac{n_i}{N_i} + \left(\sum_{k=1}^{i-1} D_k \right)^{\frac{1}{m_i}} \right]^{m_i}$$

Рассматривается возможность применения данной модели для процесса накопления повреждений с переменными параметрами цикла. Схема подсчета накопления повреждения сложной формы представлена на рисунке 4, где каждая кривая на рисунке показывает изменение степени поврежденности от числа наработки для каждой формы простого цикла. Таким образом, два цикла простой формы описывают процесс повреждения за один цикл сложной формы. Для разных амплитуд были подобраны значения коэффициентов m_i , которые позволяют прогнозировать долговечность материала при сложной (М-образной) форме нагружения.

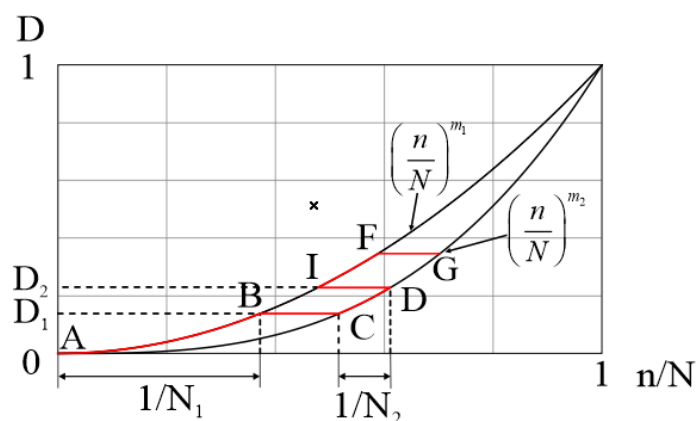


Рис.4. Схема расчета накопления повреждений сложной формы

На основе данной модели осуществляется прогнозирование циклической долговечности для блочного циклического нагружения.

Работа поддержана РФФИ, проект № 19-38-90270

Литература

1. M.Wang, J.C.Pang, H.Q.Liu, C.L.Zou, S.X.Li, Z.F.Zhang Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 127. – P. 268-274.
2. Стрижиус В.Е. Методы расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном нагружении // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 187. – С. 65-73.
3. Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Лыкова А.В. Механическое поведение конструкционной стали ЭП517Ш при двухосной малоцикловой усталости в условиях нормальных и повышенных температур // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 77-86.
4. Ильиных А.В., Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при двухосном циклическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 115-123.
5. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Изучение закономерностей накопления повреждений конструкционных сплавов при одноосном малоцикловым нагружении // XII международная конференция "Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций". – Екатеринбург, 2018. – С. 209.
6. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low cycle fatigue and crack grown in powder nickel alloy under turbine disk wave form loading: validation of damage accumulation model // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 467. – P. 312-317.
7. Вильдеман В.Э. Моделирование процессов деформирования и разрушения композитов. Ч. 1: Модели накопления повреждений: Учебю пособие / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 76с.
8. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА КЛЕЕВОГО ШВА И
ПАРМЕТРА ЁМКОСТИ В СОЕДИНЕНИИ ТИПА ВАЛ-ВТУЛКА**
*RESEARCH OF DEPENDENCE QUALITY OF ADHESIVE SEAM AND
CAPACITY PARAMETER IN CONNECTION OF TYPE SHAFT-SLEEVE*

Масленникова Е.В. – ассистент

МГТУ им. Н.Э. Баумана

maslennikova.ekaterina-1105@yandex.ru

Abstract. In the work shows the use of adhesive joints and the features of their control. The requirements for a control device that is built into a conveyor line are described. A new technology for connecting parts of the shaft-sleeve is considered, on the example of which a new testing method is being developed. The results obtained allow us to conclude that this method is applicable and the feasibility of further research.

Key words: control of glued joints, electroresistive method, electric capacitive method.

Аннотация. В статье приведен анализ применения клеевых соединений и особенности контроля таких соединений. Описаны требования, предъявляемые к устройству контроля, встраиваемого в конвейерную линию. А также рассмотрена новая технология соединения деталей вал-втулка, на примере которой происходит отработка нового метода контроля. Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости данного метода и целесообразности дальнейших исследований.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ёмкость, клеевое соединение, электроёмкостной метод.

Клеевые соединения находят все большее применение в связи с созданием высококачественных синтетических клеев. В машиностроении широко используются клеевые соединения материалов в разнообразных сочетаниях, успешно работающие при нормальной и повышенных температурах; клеи позволяют повысить прочность конструкций, уменьшить массу изделий и т.д. В машиностроении применяются клеи, которые эксплуатируются в силовых соединениях при температурах до 250-350°C, а некоторые клеевые композиции могут использоваться в конструкциях, временно подвергнутых воздействию температур до 1000°C и выше. В станкостроении синтетические клеи находят применение при склеивании пластмассовых накладных направляющих с чугунными основаниями станин, резины с металлом, при склеивании режущих инструментов из твердых сплавов и керамических материалов с металлической оправками и других соединениях, к которым предъявляются требования высокой прочности. Применение клеев при сборке технологической оснастки позволяет обеспечить необходимую прочность, упростить конструкцию, уменьшить ее массу и снизить стоимость в 1,5-2 раза трудоемкость обработки и сборки.

Контроль сборки клеевых соединений является одним из обязательных этапов технологического процесса сборки. Методы и организационные формы контроля зависят от ответственности соединения, габаритов изделия, оснащенности и серийности производства.

Контроль качества склеивания ответственных соединений осуществляют визуально. Ответственные соединения подвергают испытаниям, которые разделяют на неразрушающие и разрушающие.

Важным критерием выбора метода контроля клеевого соединения является серийность производства. В мелкосерийном и единичном производстве применяют универсальные методы контроля, которые не требуют высокой квалификации и дорогостоящей подготовки. Предпочтение отдается неразрушающим методам контроля. Исключение в данном случае составляют особо ответственные изделия. В

крупносерийном и массовом производстве таких ограничений нет. Однако до настоящего времени, существует проблема при выборе устройства контроля, которое можно легко встроить в конвейерную линию. Устройства, работающие на основе разрушающих методов контроля для конвейерной сборки не пригодны.

К устройству контроля качества сборки клеевого соединения, встраиваемого в конвейерную линию, предъявляются следующие требования. Устройство должно быть основано на методе безопасном для здоровья рабочих, не требовать громоздких средств защиты, легко встраиваться в автоматический цикл. Само устройство должно быть выполнено в компактной форме, мобильно перестраиваться на новую продукцию, настройка его не должна требовать высококвалифицированного персонала. Это устройство не должно требовать большого подготовительно-заключительного времени для настройки на новую серию изделий, с различными габаритами, толщиной и конфигурацией клеевого шва различной химической природы. Главным требованием, которое предъявляет конвейерная сборка для встраиваемых устройств - это то, что выполнение функциональных операций должно укладываться в сборочный такт. Как видно из перечисленного большинство методов контроля не позволяют создать устройство, легко подающегося автоматизации работы при конвейерной сборке [1].

В связи с этим появилась задача разработки метода контроля сборки клеевых соединений электрорезистивным и электроёмкостным методами. Данный подход основан на использовании при контроле качества клеевого соединения прецизионных электрорезистивных и электроёмкостных методов измерений [2].

В МГТУ им. Н. Э. Баумана разрабатывается новая технология сборки клеевых цилиндрических соединений. Ключевой задачей, возникающей при проведении эксперимента по формированию технологического шва, является контроль времени ручного отверждения при различных значениях температуры валика. Анализ литературы позволил установить, что существуют взаимосвязь между степенью отверждения клеевого состава и его диэлектрической проницаемостью [3]. Наличие данной взаимосвязи дает возможность контролировать время ручного отверждения по значению диэлектрической проницаемости полимера [4]. Для осуществления контроля необходимо установить значение проницаемости, которое соответствует времени достижения ручной прочности.

На настоящее время проведены первые опыты, в которых была измерена проницаемость цилиндрического клеевого соединения с технологическим швом без нагрева валика после полного отверждения клея. Диаметральный зазор в соединении составил 0,3 мм, использовался анаэробный клей Loctite 638. Диаметр соединения – 36 мм, длина соединения – 31 мм, клей наносился на длину 10 мм.

Для контроля времени ручного отверждения при проведении исследования, необходимо определить зависимость значения ёмкости от параметров клеевого шва, а также стоит задача определения диэлектрической проницаемости клея [5].

Цилиндрическое клеевое соединение с зазором можно представить, как цилиндрический конденсатор. Для расчета ёмкости цилиндрического конденсатора используется следующая формула:

$$C = \frac{2\pi * l * \varepsilon * \varepsilon_0}{\ln \frac{r_1}{r_2}}$$

где l – длина конденсатора, мм;

ε – диэлектрическая проницаемость клеевого слоя;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

r_1 – радиус внутреннего цилиндра, мм;

r_2 – радиус внешнего цилиндра, мм.

На первом этапе проведения эксперимента была поставлена задача по определению значения ёмкости. Для этого на исследуемом образце было условно выделено 26 точек

(рисунок 1). Для увеличения полученной информации в каждой точке было проведено по 10 измерений. Полученные данные представлены в таблице 1.



Рис. 1. Проведение измерений опытных образцов

Таблица 1. Значение ёмкости (нФ) образца 1

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	9,66	11,67	3,08	6,59	4,56	7,05	6,79	6,33	6,28	6,58
2	7,23	4,34	1,76	2,13	8,40	5,13	4,32	10,48	5,28	8,93
3	4,54	6,38	5,77	4,01	6,97	5,65	5,87	4,51	3,61	4,51
4	1,16	5,50	8,18	3,05	6,09	4,57	7,21	9,96	6,24	2,47
5	2,45	2,93	7,40	2,96	7,39	4,14	4,65	3,61	1,57	3,33
6	1,03	6,50	6,01	2,61	5,64	3,99	1,70	2,03	2,91	2,18
7	5,56	4,12	1,07	2,08	1,53	1,47	5,21	12,29	3,11	3,28
8	4,24	2,33	4,80	5,14	7,02	9,60	10,44	3,43	2,52	7,87
9	5,16	6,51	6,41	2,70	10,06	2,82	2,74	3,22	3,00	1,96
10	8,75	12,28	7,21	1,75	2,86	4,36	9,04	7,28	4,64	6,95
11	7,61	2,11	4,70	5,79	3,11	5,84	3,48	6,38	3,94	7,92
12	5,49	2,58	9,63	4,85	10,31	6,18	8,31	4,53	6,14	4,72
13	8,81	3,14	3,46	11,68	5,27	5,00	4,01	3,92	4,43	7,64
14	6,70	3,37	1,71	6,80	7,95	4,05	3,31	8,76	3,11	3,61
15	1,59	3,43	1,55	3,23	2,97	12,15	6,01	7,60	5,29	2,92
16	4,99	12,24	11,00	4,18	4,18	10,87	2,63	5,80	3,27	10,00
17	6,11	2,31	14,61	8,00	6,01	7,73	3,77	4,42	5,23	9,61
18	4,51	1,80	1,58	11,00	9,47	1,94	1,75	10,18	4,46	7,14
19	7,98	8,95	5,13	10,66	5,21	6,32	4,96	4,28	2,11	8,35
20	7,20	3,66	10,01	3,95	7,55	1,60	5,29	5,50	9,76	5,19
21	2,38	3,68	3,63	4,12	9,42	4,00	9,62	1,53	5,21	1,69
22	10,66	3,99	9,85	5,75	6,09	7,34	2,37	8,09	6,13	4,16
23	2,50	4,11	1,73	1,01	3,98	5,25	4,62	4,61	9,22	8,34
24	1,37	2,65	5,59	9,44	4,70	6,25	7,80	2,97	6,97	4,65
25	2,01	1,56	6,61	4,52	8,63	3,90	4,04	2,54	7,64	5,47
26	8,55	2,81	6,00	1,09	5,39	3,44	1,88	3,87	5,57	3,65

По полученным данным построен график (рис.2). В ходе исследования был получен следующий результат: среднее значение ёмкости образца – 5,357 нФ. На графике видно, что пик значения ёмкости приходится на точку, в которой площадь контакта склеиваемых поверхностей была больше. Также по минимумам значений можно сделать вывод о наличии недостаточного значения ширины клеевого шва.



Рис. 2. Проведение измерений опытных образцов

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что связь между ёмкостью и площадью контакта клеевого соединения цилиндрических деталей присутствует. Это в свою очередь позволяет перейти ко второму этапу исследования – определение диэлектрической проницаемости анаэробного клея по значению ёмкости данного соединения.

Литература

1. Игнатов А.В., Комшин А.С., Потапов К.Г., Масленникова Е.В. Особенности измерительного контроля сборки клеевых соединений электрорезистивными и электроёмкостными методами // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 6. С. 13-18.
2. Лузина А.А., Тумакова Е.В., Сырицкий А.Б., Комшин А.С. Разработка системы измерительного контроля адгезионных соединений в машиностроении с учетом влияния шероховатости поверхности // Приборы. 2016. № 11 (197). С. 9-13.
3. Ли Р.И., Богданов А.В. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения // Клеи, герметики, технологии. 2005. №3. С. 15-17.
4. Игнатов А.В., Комшин А.С., Потапов Г.К., Масленникова Е.В. Особенности измерительного контроля сборки клеевых соединений электрорезистивными и электроёмкостными методами // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № С. 1318.
5. Масленникова Е.В., Мозгин С.В., Игнатов А.В., Комшин А.С. Контроль времени ручного отверждения клеевого слоя диэлькометрическим методом // Сборник трудов. Тезисы докладов III Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии». 2019. С.100-102.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВИЖНЫХ ОПОР ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ¹ CENTER-PIVOT IRRIGATION MACHINE MOVEABLE TOWERS CONTROL ALGORITHMS

Мирошкина М.В.¹ – асп., Лепетухин К. Ю.¹ – асп., Малолетов А.В.^{1,2} – д.ф.-м.н., зам.
руководителя центра НТИ, профессор

¹Волгоградский государственный технический университет

²Университет Иннополис

mariatiminen@yandex.ru, lepkon@gmail.com, maloletov@gmail.com

Abstract. Center-pivot irrigation machine moveable towers control algorithms are presented. The algorithms are implemented as a program for modelling the kinematic of center-pivot irrigation machine movement. The comparative analysis of laws of movement of moveable towers for processing square fields is performed on the criteria of total track length and back feed coefficient.

Key words: optimal control, walking machines, center-pivot irrigation, free-shaped fields

Аннотация. Разработаны алгоритмы управления движением подвижных опор дождевальной машины кругового действия при обработке полей произвольной формы. Алгоритмы реализованы в виде программы моделирования кинематики движения многоопорной дождевальной машины кругового действия. Проведен сравнительный анализ законов движения подвижных опор при обработке квадратного поля по критериям суммарной длины следовых дорожек и коэффициента обратного хода.

Ключевые слова: Оптимальное управление, шагающие машины, дождевальные машины кругового действия, поля произвольной формы

Введение. Дождевальные машины кругового действия состоят из последовательно соединенных секций трубопровода, закрепленных на подвижных опорах на колесных или шагающих [1] (рисунок 1) и совершающих, в общем случае, плоское движение вокруг неподвижной центральной опоры. Система управления такими машинами поддерживает их прямолинейную конфигурацию за счет остановки подвижных опор секций, «убегающих» вперед, что обуславливает круговую форму обрабатываемого поля (рисунок 2). Существуют разные подходы к повышению эффективности работы дождевальных машин кругового действия [2, 3]

В [4] показана возможность обработки полей произвольной формы с использованием дождевальных машин кругового действия, при замене колесных движителей на движители, обеспечивающие движение в произвольном направлении. Одним из вариантов таких движителей являются шагающие, например, ортогональные спаренные движители, используемые в шагающей машине «Ортоног» (рисунок 3) разработки и изготовления ВолгГТУ и АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» г. Волгоград [5]. Такой привод обеспечивает «идеальную» маневренность, т.е. возможность совершать произвольное плоскопараллельное движение в плане местности.

Следует учесть, что оптимизация движения возможно как на высоком уровне (синтез траектории), так и на низком (шагание, включая перенос стопы [6]). Для простоты принимается, что движение опор индивидуальных шагающих роботов оптимизированно по некоторой системе показателей. А движение машины в целом рассматривается как движение группы мобильных роботов [7].

Оценка алгоритмов управления. В исследовании предлагаются различные алгоритмы управления опорными тележками дождевальной машины, обеспечивающие обработку

¹ Работа поддержана РФФИ, проект № 18-38-00946 мол_а

поля произвольной формы. Для моделирования алгоритмов разработана программа, выполняющая расчет траекторий движения опор дождевальной машины. Алгоритмы оцениваются по двум критериям: длина следовой дорожки и коэффициент обратного хода.

Энергоэффективность работы дождевальной машины можно оценивать по работе, затрачиваемой на преодоление пути. Соответственно, уменьшение суммарной длины следовых дорожек приводит к снижению затрат на перемещение.

Коэффициент обратного хода характеризуется величиной отношения суммарной длины следовых дорожек к пути, пройденному в обратном направлении.



Рис.1. Дождевальная машина с шагающим движителем



Рис.2. Космическая фотография круглых полей



Рис.3. Шагающая машина «Ортоног»

Предложено четыре алгоритма движения подвижных опор дождевальной машины: «гармошка», «пара», «последовательность», «хорды окружности».

1 Алгоритм «Пара»

Алгоритм предполагает движение четных подвижных опор всегда вдоль линии, соединяющей неподвижную опору и текущую точку на кромке поля. В зависимости от обрабатываемого радиуса одна или несколько нечетных опор (начиная с ближней к неподвижной) двигаются с опережением (или замедлением), обеспечивая поворот секций друг относительно друга. Нечетные подвижные опоры, располагающиеся дальше от центра, сохраняют прямолинейную конфигурацию машины до тех пор, пока уменьшение радиуса не позволяет компенсировать его за счет работы предыдущих опор.

При рассмотрении данной модели принято ограничение на минимальный угол между секциями. Вариант обработки квадратного поля с половиной диагонали равной полной длине дождевальной машины представлен на рисунке 4.

При данной конфигурации суммарная длина следовых дорожек равна 1,26 длины следовых дорожек дождевальной машины кругового действия необходимой для орошения той же площади. С уменьшением минимального угла суммарная длина следовых дорожек увеличивается, что может быть объяснено большими перемещениями вдоль линии, соединяющей центр поля и текущую точку на кромке поля, подвижными опорами.

2 Алгоритм «Последовательность»

Алгоритм предполагает движение подвижных опор секций, не участвующих в изменении конфигурации вдоль линии, соединяющей неподвижную опору и текущую точку на кромке поля. В зависимости от обрабатываемого радиуса сначала друг относительно друга поворачиваются первые две секции, начиная с неподвижной опоры, а при достижении минимального угла, следующая секция начинает поворачиваться относительно предыдущей, при этом уже повернутые до минимального угла друг относительно друга секции сохраняют свое взаимное расположение и совместно поворачиваются, относительно последующей. Вариант обработки квадратного поля с

половиной диагонали равной полной длине дождевальной машины представлен на рисунке 5.

Как в предыдущем алгоритме, угол между секциями не должен быть меньше определенного заранее заданного значения. При данной конфигурации длина следовых дорожек равна 1,40 длины следовых дорожек дождевальной машины кругового действия, необходимой для орошения той же площади. Изменение длины следовых дорожек перестает носить монотонных характер и создается возможность найти оптимальный угол для уменьшения длины следовых дорожек.

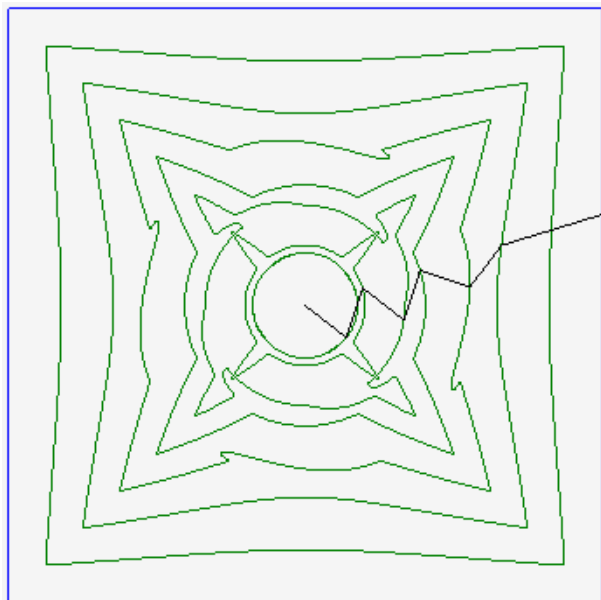


Рис.4. Траектории движения опор секций дождевальной машины в модели «Пара»

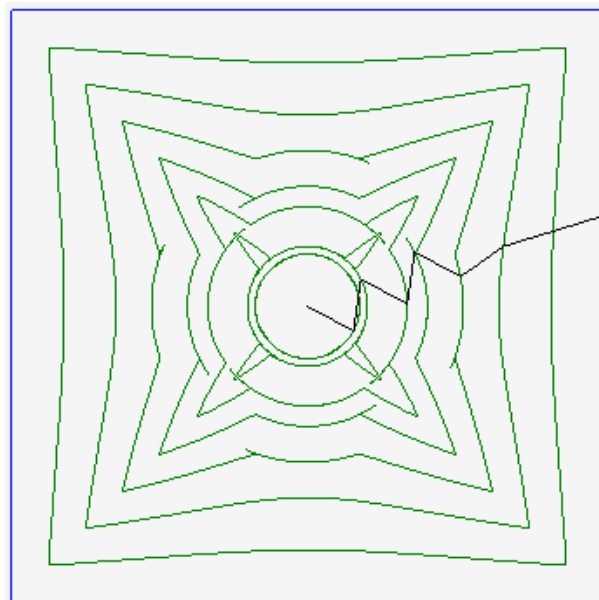


Рис.5. Траектории движения опор секций дождевальной машины в модели «Последовательность»

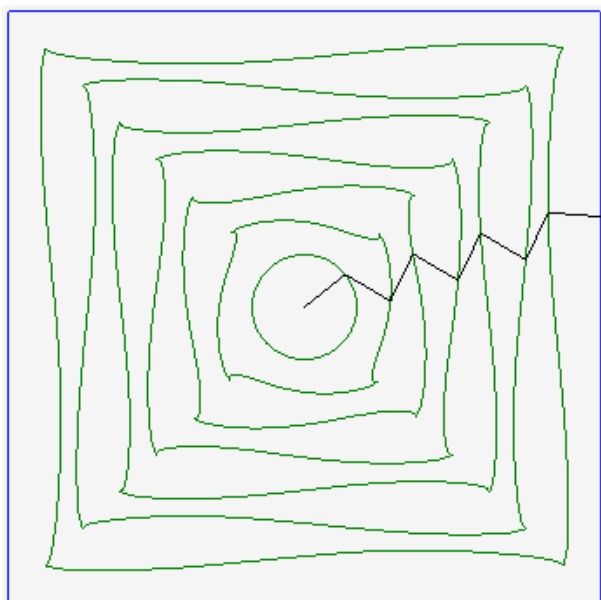


Рис.6. Траектории движения опор секций дождевальной машины в модели «Гармошка»

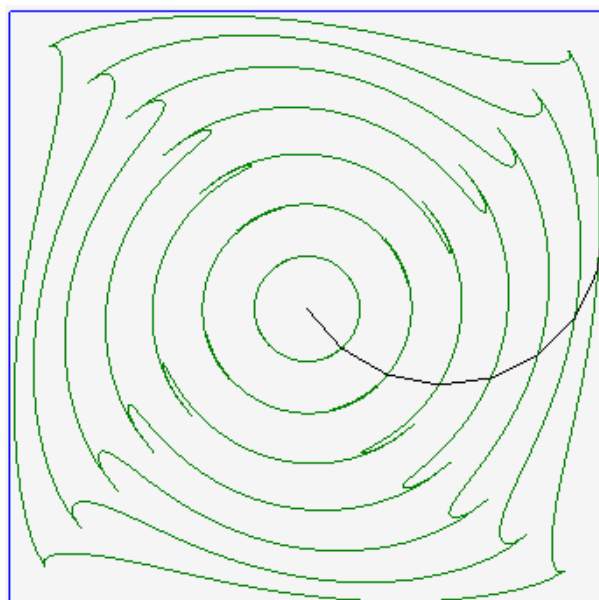


Рис.7. Траектории движения опор секций дождевальной машины в модели «Хорды окружности»

3 Алгоритм «Гармошка»

Модель предполагает движение подвижных опор дождевальной машины путем размещения их поочередно по разные стороны от линии, соединяющей центральный пост и крайнюю опору.

Вариант обработки квадратного поля с половиной диагонали равной полной длине дождевальной машины представлен на рисунке 6. При данной конфигурации длина следовых дорожек равна 1,18 длины следовых дорожек дождевальной машины кругового действия, необходимой для орошения той же площади. В связи с тем, что в изменении радиуса участвуют все секции, минимальный угол между ними установлен не был.

4 Алгоритм «Хорды окружности»

Модель предполагает движение подвижных опор дождевальной машины так, чтобы ее секции представляли собой хорды описанной вокруг машины окружности.

Вариант обработки квадратного поля с половиной диагонали равной полной длине дождевальной машины представлен на рисунке 7. При данной конфигурации длина следовых дорожек равна 1,44 длины следовых дорожек дождевальной машины кругового действия, необходимой для орошения той же площади. В связи с относительно небольшими отклонениями угла между секциями и участия всех секций в изменении текущего обрабатываемого радиуса, минимальный угол между ними установлен не был.

Закключение. В соответствии с предложенными критериями алгоритм «Гармошка» является более выгодным как с точки зрения суммарной длины следовых дорожек, так и по коэффициенту обратного хода.

Анализ следовых дорожек, выполненных в соответствии с алгоритмами «пара» и «последовательность», говорит о высоком коэффициенте обратного хода, причем при последовательном складывании этот коэффициент выше, за счет движения группы уже сложенных секций назад для обеспечения поворота последующих секций. Алгоритм «Хорды окружности» показал наихудший результат по обоим критериям.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют вычислять траектории и законы движения опор дождевальных машин при обработке полей различной формы с оценкой качества алгоритмов по заданным критериям.

Работа поддержана РФФИ, проект № 18-38-00946 мол_a

Литература

1. Брискин Е.С. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В. // Тракторы и сельхозмашины – 2011 - № 9 – С. 27-31.
2. Слюсаренко В.В., Надежкина Г.П., Рыжко Н.Ф. Технические решения для повышения площади полива и коэффициента земельного использования дождевальных машин кругового действия // Научная жизнь. 2014. No2. С.100-109
3. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells / М.А. Moreno, D. Medina, J.F. Ortega, J.M. Tarjuelo // Agricultural Water Management 107 (2012). P. 112–121. doi:10.1016/j.agwat.2012.01.016
4. Лепетухин, К.Ю. Об оптимальном управлении взаимным расположением секций дождевальной машины кругового действия при обработке некруглых полей / Лепетухин К.Ю., Малолетов А.В., Брискин Е.С. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2017. - Т. 18. № 2. - С. 103-107.
5. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Брискин Е.С., Вершинина И.П., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2014. - № 3. - С. 168.
6. Мирошкина, М.В. Об энергетически эффективных режимах движения шагающего

робота при его движении по неровной поверхности / М.В. Мирошкина, Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Юбилейная XXX Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2018) (г. Москва, 20-21 ноября 2018 г.) : сб. тр. конф. / отв. ред.: Н. А. Татусь ; Российская Академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления, РФФИ, Ин-т машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН (ИМАШ РАН). - Москва, 2019. - С. 483-485.

7. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРА АВТОМОБИЛЯ О
ДОРОЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**
*PROBLEMS OF MODELING THE IMPACT OF A CAR ON A ROAD BARRIER BY
THE FINITE ELEMENT METHOD*

Михеев П.С. – аспирант, ассистент, **Демьянушко И.В.** – д.т.н., профессор, **Карпов И.А.** –
аспирант, старший преподаватель

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
psmikheev95@gmail.com

Abstract. The safety of the driver and passengers is a priority task of the design and testing of the vehicle. One of the most effective ways to ensure road safety is the installation of road barriers. The article deals with the issues of finite element (FE) modeling of the car when it impacts with road barriers using the LS-DYNA software. The article investigates the simulation of a car with an oblique impact on the road barrier, in particular, the issues of friction between the wheels of the car and the road, the friction elements of the car and the road barrier, the problems of describing large deformation and destruction of parts with large grids and interaction with elements of a small overlap area.

Key words: FEM, vehicle, road barriers, friction, destruction.

Аннотация. Безопасность водителя является приоритетной задачей для инженеров. Одним из способов ее обеспечения является повышение пассивной безопасности транспортных средств. Другим способом повышения безопасности на дорогах является улучшение конструкций дорожных ограждений. В статье рассматриваются вопросы конечно-элементного (КЭ) моделирования автомобиля при столкновении с дорожными ограждениями с использованием программного комплекса LS-DYNA. В статье представлен ряд проблем моделирования автомобиля при косом ударе о дорожное ограждение, в частности, рассмотрены вопросы трения между колесами автомобиля и дорогой, трения элементов автомобиля и дорожного ограждения, проблемы описания больших деформации и разрушения деталей при крупных сетках МКЭ и взаимодействия с элементами малой площади перекрытия.

Ключевые слова: МКЭ, транспортное средство, дорожное ограждение, трение, разрушение.

Введение. Сохранение жизней водителей и пассажиров при ДТП – одна из наиболее актуальных проблем во всем мире. В России эта проблема сформулирована в национальном проекте «Безопасные и качественные дороги», в котором поставлена задача сокращения смертности на дорогах в 3.5 раза к 2024 году. Существенное снижение тяжести ДТП достигается двумя путями: улучшением конструкции кузова автомобиля или улучшением конструкции дорожных ограждений. При проектных работах эффективным инструментом анализа является виртуальное моделирование наезда автомобиля на ограждение с использованием аппарата нелинейной динамики на базе МКЭ[1]. В настоящей статье рассмотрены проблемы конечно-элементного (КЭ) моделирования автомобиля (а/м) в виртуальных моделях взаимодействия а/м с дорожными ограждениями.

Специфика взаимодействия а/м и дорожного ограждения. Процесс взаимодействия а/м с ограждением может быть условно разделен на три этапа. Сначала а/м движется к ограждению под углом с определенной скоростью, затем происходит контакт поверхности кузова автомобиля и ограждения, переходящий в удар, после которого автомобиль выходит из контакта с ограждением и движется по свободной траектории (Рис. 1).

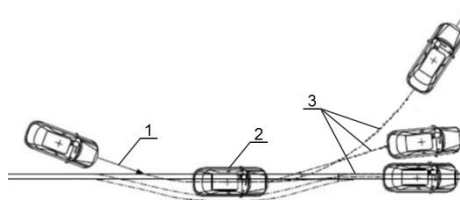


Рис. 1. Этапы взаимодействия автомобиля и ограждения при ударе: 1 – движение автомобиля до контакта с ограждением, 2 – удар, 3 – движении автомобиля после удара

Каждый из этапов взаимодействия существенно отличается от условий краш-тестов а/м по Euro NCAP. Основными отличиями являются большие потери на трение из-за относительного смещения поверхностей кузова а/м и ограждения, при их взаимодействии. Большая сложность определения контактных поверхностей возникает в задаче контакта из-за косого удара. Также большая размерность модели ограждения (минимальная длина моделируемого ограждения около 60 метров), накладывает ограничения на размер КЭ сетки, что осложняет решение задачи механики разрушения. Поэтому подходы к моделированию а/м при краш-тестах по Euro NCAP не всегда могут быть применимы для описания взаимодействия а/м с дорожным ограждением.

Процесс наезда является быстропротекающим и нелинейным [2], и для решения этой задачи необходимо использовать компьютерные технологии, позволяющие снизить экономические и временные затраты. В данном исследовании использовался конечно-элементный (МКЭ) лицензированный комплекс инженерного анализа LS-DYNA, позволяющий решать задачи нелинейной динамики.

Проблемы при решении задач косого удара а/м о дорожное ограждение. КЭ моделирование является одним из мировых методов решения инженерных и исследовательских задач. Конечно-элементная модель (КЭМ), используемая в виртуальном испытании, состоит из а/м,двигающегося по жесткой поверхности, и дорожного ограждения, с которым происходит удар (Рис. 2).

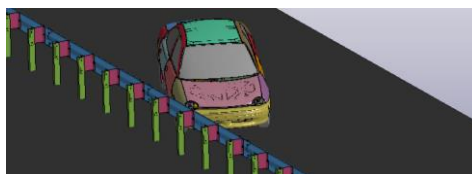


Рис.2. Конечно элементная модель автомобиля и дорожного ограждения

Проблемы решения контактной задачи в случае данного испытания заключаются в определении коэффициента трения между колёсами а/м и дорожным покрытием, а/м и дорожным ограждением. Значение коэффициента трения в коде программного комплекса LS-DYNA определяется по формуле (1):

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v|}, \quad \text{где}$$

μ_s – статический коэффициент трения, μ_d – динамический коэффициент трения, v – относительная скорость между точками, определяющими контакт поверхностей.

В случае трения колёс а/м и дороги используется коэффициент статического трения. В технической литературе есть значения коэффициентов статического трения, однако проблема заключается в его выборе, так как испытания проводятся круглый год при различных погодных условиях, от которых зависит этот коэффициент. Испытания проводятся на испытательном полигоне с асфальтовым покрытием, но даже при ясной погоде при температуре 20°C коэффициент статического трения может меняться в связи с загрязненностью покрытия, вызванного монтажом ограждения. При испытаниях барьерного и мостового ограждений коэффициент трения тоже отличается, так как мостовое ограждение устанавливается на покрытие с асфальтом, а барьерное может устанавливаться на грунтовой

[3] поверхности.

Для оценки влияния коэффициента трения между колёсами а/м и опорной поверхностью были проведены виртуальные испытания с различными вариантами коэффициента статического трения. Результаты испытаний представлены на рисунке 3, анализ результатов показал значительное отличие в траектории а/м при испытании в зависимости от выбранного коэффициента статического трения.

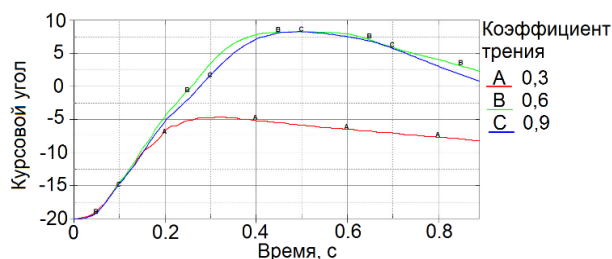


Рис.3. График зависимости курсового угла автомобиля от коэффициента трения колес с контактной поверхностью

При ударе а/м и ограждения возникает трение из-за относительного скольжения кузова по балке дорожного бокового ограждения, при этом происходит длительный контакт поверхностей с изменением скорости. В этом случае для определения коэффициента трения необходимо учитывать, как статический, так и динамический коэффициенты. Для определения влияния трения на движение а/м при ударе о барьерное дорожное ограждение были проведены расчеты, в которых изменялись коэффициенты статического и динамического трения (Рис. 4, а и б). Как показали результаты расчетов при коэффициентах трения, принятых в 1-ом случае, происходит зацеп а/м за стойку ограждения и его разворот. Во 2-ом случае а/м после удара об ограждение выходит из контакта.

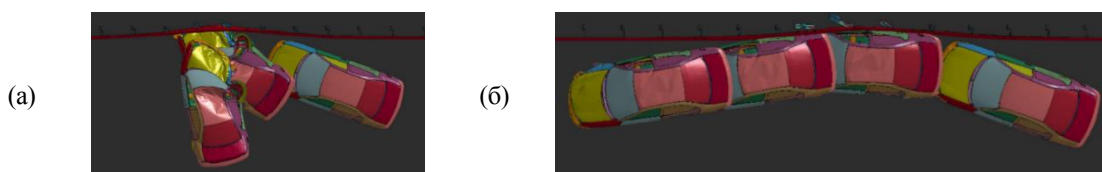


Рис. 4. Варианты расчетов с разными принятыми коэффициентами трения между автомобилем и ограждением: а - $\mu_s=0,74, \mu_d=0,57$, б - $\mu_s=0,20, \mu_d=0,01$

В настоящее время на дорогах устанавливаются ограждения разных типов – барьерные металлические, тросовые и парапетные (бетонные). Механика поведения модели а/м при ударе о тросовые системы значительно отличается от механики взаимодействия а/м с барьерным ограждением. При наезде на тросовое ограждение контакт происходит в локальной области – по тросу, при этом возникают большие контактные усилия в узлах открытых граней деталей кузова [4]. Из-за этого происходит деформирование элементов в модели кузова, приводящее к накоплению численных ошибок, влияющих на результаты расчета. Эта проблема отчасти решается путем создания замкнутой поверхности кузова а/м без открытых кромок [5]. В отечественной дорожной практике тросовые ограждения, в основном, устанавливаются на узкой разделительной полосе, конструкция стоек усилена, поэтому тросы работают совместно со стойками, не отрываясь от них. При контакте со стойкой такой тросовой системы происходит удар с менее, чем 25% перекрытием, в отличие от удара при краш-тестах а/м, где данное значение перекрытия является минимальным. В результате такого удара большая часть энергии концентрируется в области первичного контакта а/м и тросовой системы, и при наезде на стойку разрушает детали и узлы, находящиеся в зоне удара. Происходит отрыв крыльев, бамперов, колес (Рис. 5).



Рис. 5. Автомобиль после удара: (а) тросовое ограждение, удар не в лонжерон, (б) тросовое ограждение удар в лонжерон, (в) краш-тест с перекрытием 25%

В связи с этим возникает не только контактная проблема, но и проблема разрушения деталей и узлов, при которой необходимо определить критерии разрушения. Это также актуально при ударе колеса [6] легкового а/м в стойку ограждения, при котором происходит его отрыв или разворот а/м. Поэтому решение [5] не подходит для данной задачи, так как модель с замкнутой поверхностью кузова не учитывает разрушения.

В области моделирования краш-тестов дорожных ограждений существует ряд особенностей, которые не позволяют использовать КЭМ а/м, которые созданы автопроизводителями. Такие КЭМ содержат несколько миллионов элементов и направлены на выявление повреждений а/м при ударе. Время удара при краш-тесте а/м занимает около 0,3 с, в то время как взаимодействие а/м с ограждением может превышать это значение в несколько раз, поэтому использование таких КЭМ невыгодно, в том числе, из-за времени расчета. Эта проблема решается упрощением КЭМ путем удаления деталей, не влияющих на результат испытания, замены на более простые конструкции, увеличением шага сетки и изменением типа элементов. Такие изменения влияют на работу изменяемой конструкции, поэтому необходимо определить, что может быть упрощено в рассматриваемой КЭ модели.

При увеличении размерности сетки деталей передней подвески а/м, которые наиболее подвержены разрушению при ударе из-за больших деформаций, возникает проблема в применении критерия разрушения, который хорошо описывает процесс разрушения на мелких сетках.

Выводы. Рассматриваемые в статье проблемы, касающиеся выбора параметров контакта, трения и разрушения а/м при ударе о дорожные ограждения, на сегодняшний день остаются актуальными. В дальнейшем планируется развитие этих исследований.

Литература

1. Demiyanyushko, I. Applications Fem Analysis in Researches Reliability and Dynamics of Road Safety Barriers at Collisions With Cars / Demiyanyushko, I., Karpov, I., Tavshavadze, B. // Mechanisms and Machine Science. – 2019. – 73. – С. 1651-1658
2. Awrejcewicz, J. Contact interaction of two rectangular plates made from different materials with an account of physical nonlinearity / Awrejcewicz, J., Krysko, V.A., Zhigalov, M.V., Krysko, A.V. // Nonlinear Dynamics – 2018. – 91(2). – С. 1191-1211
3. Тавшавадзе Б.Т. Влияние параметров стойки на динамический прогиб тросовых дорожных ограждений / Тавшавадзе Б.Т., Титов О.В. // Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017) материалы конференции – 2017. – С. 56-64
4. Demiyanyushko, I.V. COMPUTATIONAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF CABLE FOR CABLE BARRIERS / Demiyanyushko, I.V., Karpov, I.A., Nadezhdin, V.S. // Mechanisms and Machine Science. – 2019. – 73. – С. 2883-2891
5. Mongiardini, M. Investigation of a series of relevant phenomena for modelling the full-scale crash test of a small vehicle with a guardrail system / Mongiardini, M., Reid, J.D. // ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011–2011. – 9– С.69-75
6. Demiyanyushko, I. The dynamic behavior of the vehicle wheels under impact loads—FEM and experimental researches / Demiyanyushko, I., Vakhromeev, A., Loginov, E., Mironova, V. // Springer Proceedings in Mathematics and Statistics – 2018. – 248 – С. 125-134

**МАТРИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СИЛЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТОПЫ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ¹**
*MATRIX MEASURING FORCE THE INTERACTION OF THE FOOT WITH
THE SUPPORT SURFACE*

Аль Манджи Халиль Хамед Мохаммед – аспирант, **Е.А. Ларина** – студент, **С.Ф. Яцун** – д.т.н., профессор, зав. кафедры, **В.А. Шорстов** – студент.
Юго-Западный государственный университет
e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract. Recently, there has been an active development of robotic systems for rehabilitation, which can improve the efficiency of human recovery after injuries and other injuries. Further improvement of such systems requires the creation of new tactile sensors that allow you to control the interaction of a person and a robot. The article describes one of the ways to implement a tactile sensor from Velostat material and experimental studies.

Keywords: material Velostat, matrix, tactile sensor, resistance, copper.

Аннотация. В последнее время прослеживается активное развитие робототехнических комплексов для реабилитации, которые позволяют повысить эффективность процессов восстановления человека после травм и других повреждений. В дальнейшем совершенствование таких систем требует создания новых тактильных датчиков, позволяющих контролировать взаимодействие человека и робота. В статье рассмотрен один из способов реализации тактильного датчика из материала Velostat и экспериментальные исследования.

Ключевые слова: материал Velostat, матрица, тактильный датчик, сопротивление, медь.

Введение

В современных условиях вопросы реабилитации голеностопного сустава решаются с применением аппаратов для пассивной механотерапии голеностопного сустава, которые применяют для реализации непрерывных пассивных движений, такая терапия заключается в возвращении анатомически правильной двигательной активности суставам без каких-либо болезненных ощущений. Для оценки взаимодействия стопы пациента и стопы аппарата необходимо иметь датчики, позволяющие производить измерение силы, возникающие при этом.

Разработка различных тактильных датчиков, которые можно применять в виде «искусственной кожи» для роботов, является актуальной проблемой робототехники. Датчики должны регистрировать силовое взаимодействие человека и экзоскелета, воспринимать полученную информацию, обрабатывать, и, если нужно передавать или отображать ее. Использование «искусственной кожи» в датчиках для робототехнических систем позволяет адаптировать и повысить эффективность реабилитации.

Исследование и анализ характеристики измерений линейного измерителя силы

Для изготовления тактильного датчика использована «искусственная кожа» на основе материала Velostat, разработанного компанией Custom Materials, который является проводящим материалом [1]. Данный материал является популярным из-за своей низкой себестоимости и электропотребления. Velostat- это токопроводящий материал, который при нажатии изменяет активное сопротивление материала.

Для изучения свойств материала Velostat при нажатии, был изготовлен датчик, структура которого представлена на рисунке 1. Для изучения свойств материала, изготовлены линейный измеритель силы (ЛИС) и матричный измеритель силы (МИС).

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, № 14-08-00773А 2018 г.



Рис.1. Структурная схема ЛИС: а) подключение с резистором, б) подключение без резистора

Из рисунка 1 видно, что структура датчиков состоит из 2 медных пластин (медного скотча) и проложенным между ними материалом Velostat. В зависимости от подключения датчика с дополнительным резистором или без резистора, один из выводов датчика заземляют или же подключают к питанию.

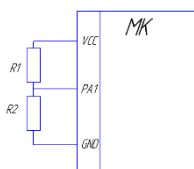


Рис.2. Схема подключения датчика, где R1-известный резистор, R2-датчик из Velostat

На рисунке 2 представлена схема подключения датчика (R2) с резистором (R1) номиналом 1кОм. В ходе проведения эксперимента было решено подключать датчик к Arduino (в дальнейшем к микроконтроллеру), как делитель напряжения.

На рисунке 3 представлена установка при помощи, которой производились измерения. Принято решение подключать линейный датчик как делитель напряжения, и был выбран резистор номиналом 1 кОм.

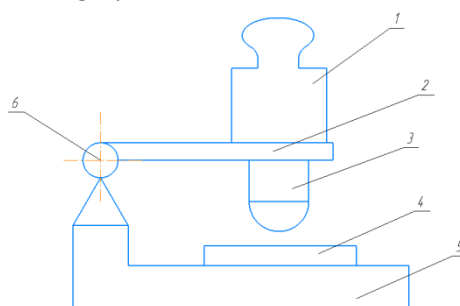


Рис.3. Установка для измерений, где 1-груз, 2-коромысло, 3-индентор, 4-датчик (чувствительный элемент), 5-недеформированная подложка, 6-шарнир

Принцип измерения заключается в том, что на подложку кладется изготовленный датчик, подключенный к Arduino с программным кодом, и ставятся грузы разного веса до 2200 грамм.

На рисунке 6 представлена зависимость напряжения линейного измерителя силы от времени.

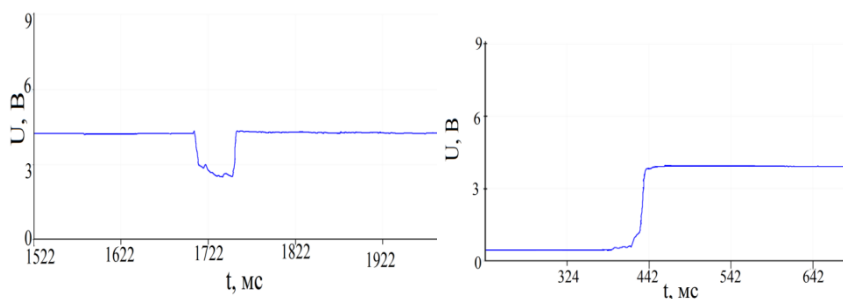


Рис.6. Зависимость напряжения от веса груза: а) вес груза 200 грамм, б) вес груза 1250 грамм

На рисунке 7 представлена зависимость напряжения от веса груза.

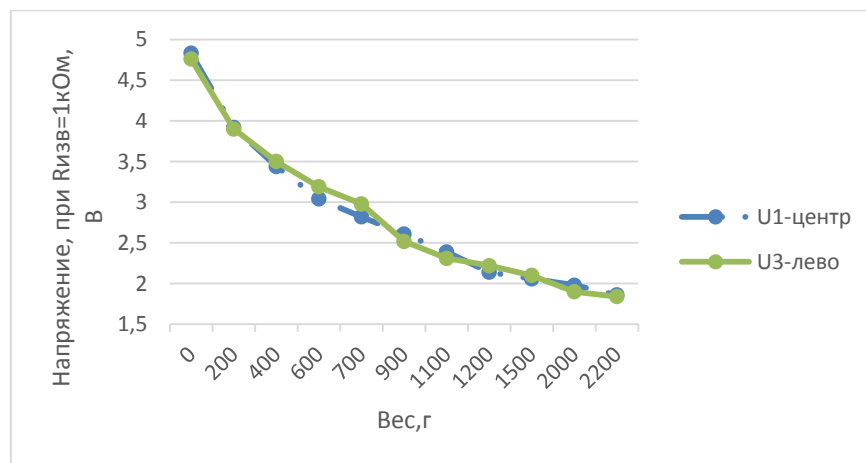


Рис. 7. Зависимость напряжения ЛИС от массы груза

На рисунке представлено 2 графика, их различие в том, что груз ставился в разные части датчика. Из графика выше видно, что при увеличении веса груза, напряжение уменьшается. Следовательно, можно сделать выводы, что месторасположение груза почти не влияет на измеряемое напряжение и график имеет нелинейную зависимость, гиперболической формы.

Экспериментальные исследования и анализ результатов матричного измерителя силы

После исследования и построения графиков зависимости напряжения от веса груза, был изготовлен МИС, который позволяет построить эпюру давления в плоскости взаимодействия стопы человека и экзоскелета. Его внешний вид и структура изготовления представлена на рисунке 4.

Разработанный матричный измеритель силы имеет 3 слоя. На внешние слои нанесены медные дорожки, между которыми расположен двусторонний скотч для скрепления слоев, также скотч служит диэлектриком между соседними медными дорожками. На одном слое дорожки расположены вертикально, на другом горизонтально.

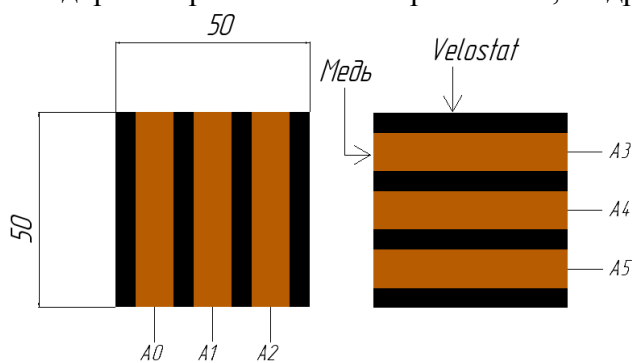


Рис. 4. Структура МИС

Способ изготовления МИС заключается в том, что к медным дорожкам припаиваются провода, которые подаются на землю (нумерация от A0 до A2). Провода, находящиеся на другой стороне от Velostat и расположенные горизонтально подключены к аналоговым входам (нумерация от A3 до A5).

На рисунке 5 представлен макет подключения МИС. Для подключения МИС необходимы: резисторы, МИС, соединительные провода, плата Arduino Uno.

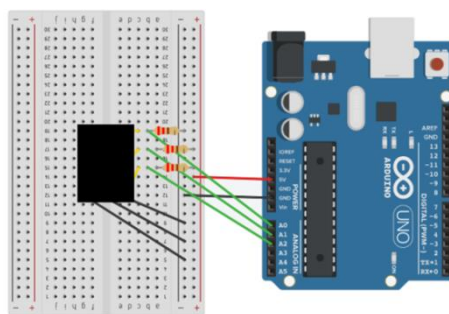


Рис.5. Макет устройства

С помощью данного макета были получена матрица на экране ПК, которая представлена на рисунке 8.

На рисунке 8 показано отображение МИС в среде Processing.

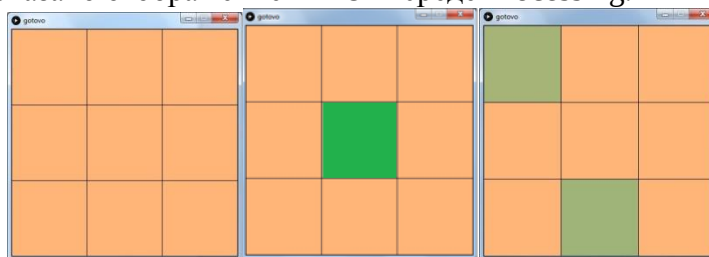


Рис.8. Отображение нажатия на матричный измеритель силы: а - нет нажатия, б - нажатие в одной точке, в - нажатие в 2 разных точках

Как видно из рисунка 8, при различной степени нажатия, место нажатия (зеленый квадрат) имеет различную насыщенность цвета.

Выводы

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы: экспериментальная матрица измерения силы может применяться для оценки взаимодействия стопы с опорной поверхностью, установлено, что зависимость сопротивления изменяется нелинейно. По результатам первичного анализа были намечены следующие направления доработки: помехоустойчивость МИС, создание большего размера МИС, увеличение точности, улучшение дизайна и др.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, № 14-08-00773А 2018 г

Литература

1. Мимс, Форрест М. (2000). Записки от Mims Circuit . Newnes. п. 69. [ISBN 978-1-878707-49-9](https://www.amazon.com/dp/0732987870)
2. SEAN SHADMAND: Touch Sensitive Button Using Conductive Fabric and Velostat. [Электронный ресурс]- <http://www.seanshadmand.com/2017/05/23/touch-sensitive-button-using-conductive-fabric-and-velostat/>
3. ALTEROZOOM: Velostat-Pressure-Sensitive Conductive Sheet [Электронный ресурс]- <https://alterozoom.com/ru/documents>
4. WIKI2: Velostat.[Электронный ресурс]- <https://wiki2.org/en/Velostat>
5. Jatsun, S., Savin, S., Yatsun, A. and Turlapov, R., 2015, December. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium on (pp. 1-6). IEEE.
6. Jatsun, S., Savin, S. and Yatsun, A., 2016, June. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization. In Control and Automation (MED), 2016 24th Mediterranean Conference on (pp. 322-326). IEEE.

СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИДЕАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕЁ РЕАЛЬНОГО АНАЛОГА НА ОСНОВЕ ТАУ

COMPARISON OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE IDEAL FIELD ORIENTED CONTROL MODEL AND ITS BASED ON ACT (AUTOMATIC CONTROL THEORY) REAL ANALOGUE

Мясоедов К.Р.^{1,2} – студент кафедры М7-КФ, Елифанов Е.Д.^{1,3} – студент кафедры М7-КФ, Масюк В.М.^{1,4} – к.ф.-м.н., доцент кафедры, зам. зав. кафедры М7-КФ, Пчелкина И.В.^{1,5} – к.ф.-м.н., доцент кафедры М7-КФ, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана¹
kirills.mjsojedovs05@gmail.com², ostrova97@mail.ru³, masyuk77@mail.ru⁴,
irinaashikhmina@gmail.com⁵.

Abstract. This article is dedicated to the accuracy of modeling the dynamic characteristics of a field oriented control model. The field oriented control model is based on automatic control theory and using the parameters of a real electric motor. As a result of the simulation, several dynamic characteristics were obtained. The comparison of these characteristics with the dynamic characteristics of the assembled system of field oriented control of a real electric motor is carried out. It is concluded that the operation of the field oriented control model with a certain error corresponds to the operation of the field oriented control system of a synchronous electric motor.
Key words: field oriented control, synchronous electric motor, field oriented control model.

Аннотация. Исследуется точность моделирования динамических характеристик модели векторного управления. Модель векторного управления построена на основе тау с использованием параметров реального электродвигателя. В результате моделирования получено несколько динамических характеристик. Проведено сравнение данных характеристик с динамическими характеристиками собранной системы векторного регулирования реального электродвигателя. Сделан вывод, что работа модели векторного управления электродвигателем с определённой погрешностью соответствует работе системы векторного регулирования синхронного электродвигателя

Ключевые слова: векторное управление, синхронный электродвигатель, модель векторного управления.

Метод управления электродвигателем переменного тока, называемый «векторное управление», появился в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века. В широком смысле векторным регулированием можно назвать все способы управления двигателем переменного тока, использующие для описания происходящих в двигателе процессов векторную математику.

Управлять скоростью двигателя можно, изменяя его момент, а момент двигателя можно менять с помощью управления вектором статорного тока. Регулирование осуществляется в системе координат, вращающейся синхронно с векторами состояний двигателя. Эту систему, как правило, связывают с вектором ψ_R – потоком ротора. Оси этой двухфазной системы координат называют d и q , причем по потоку ротора ориентируют ось d этой системы.

Векторный регулятор тока состоит из двух скалярных регуляторов d и q проекций вектора и использует в качестве обратной связи измеренный и преобразованный в систему dq реальный вектор статорного тока. Регулятор тока в этой же системе формирует вектор напряжения статора, который характеризуется двумя составляющими: U_{sd} и U_{sq} . Далее с помощью координатных преобразований вектор напряжения статора переводится в неподвижную систему координат, связанную со статором, где затем и

реализуется.

Реализация вектора напряжения статора осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Для синтеза системы управления необходимо определить связь между моментом и проекциями вектора тока статора на оси системы dq , вращающейся синхронно с потоком ротора. Для осуществления координатных преобразований необходимо знать текущий угол поворота системы dq (угол поворота ψ_R). Этот угол необходимо измерить или вычислить.

Для асинхронного двигателя соотношения, выражение момента и уравнения равновесия в системе dq :

На рис.1 приведена структура векторного управления синхронным электродвигателем

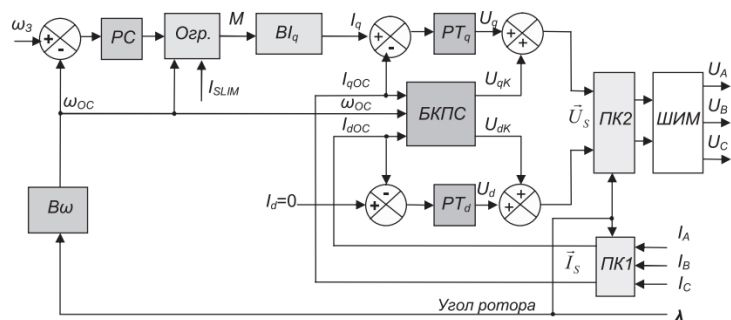


Рис.1. Структура системы векторного регулирования скорости синхронного двигателя

В неподвижной системе координат $\alpha\beta$ уравнения равновесия статора синхронного двигателя выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = \frac{d\psi_{S\alpha}}{dt} + I_{S\alpha}R_S; \\ U_{S\beta} = \frac{d\psi_{S\beta}}{dt} + I_{S\beta}R_S. \end{cases}$$

Во вращающейся системе координат dq :

$$\begin{cases} U_{Sd} = \frac{d\psi_{Sd}}{dt} + I_{Sd}R_S - \omega\psi_{Sq}; \\ U_{Sq} = \frac{d\psi_{Sq}}{dt} + I_{Sq}R_S + \omega\psi_{Sd}. \end{cases}$$

Была построена модель векторного управления синхронным двигателем (рис.2).

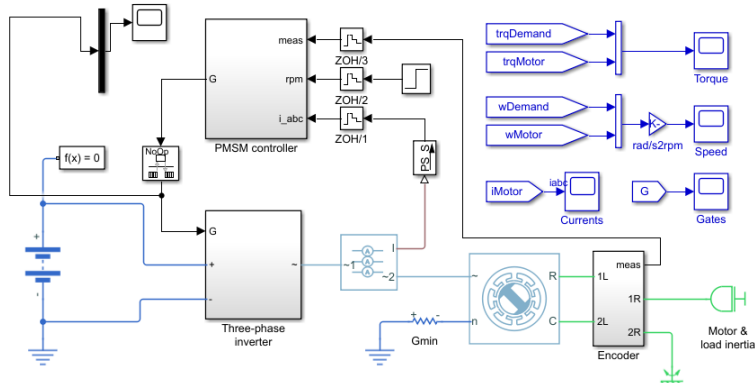


Рис.2. Модель векторного управления синхронным двигателем

В данную модель были загружены параметры реального двигателя. В результате была получена модель векторного управления двигателем с реальными параметрами на

основе ТАУ. Результаты моделирования приведены на (рис.3, рис.4, рис.5)

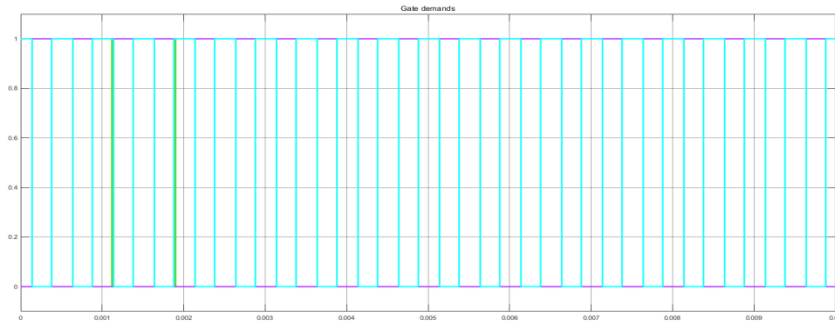


Рис.3. ШИМ-сигнал на каждой из трёх фаз в обмотках электродвигателя

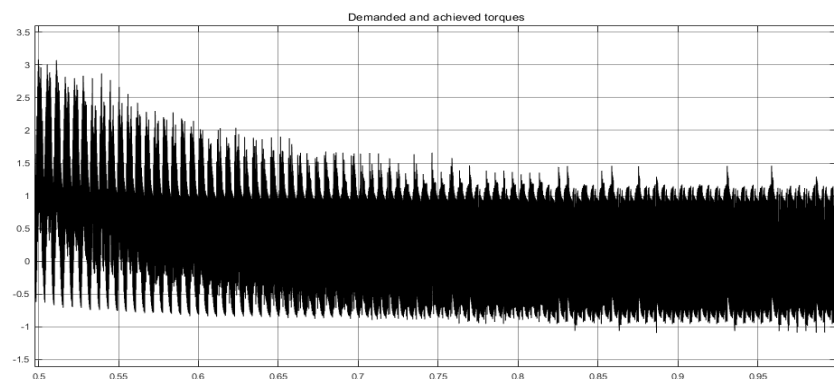


Рис.4. График момента на валу двигателя

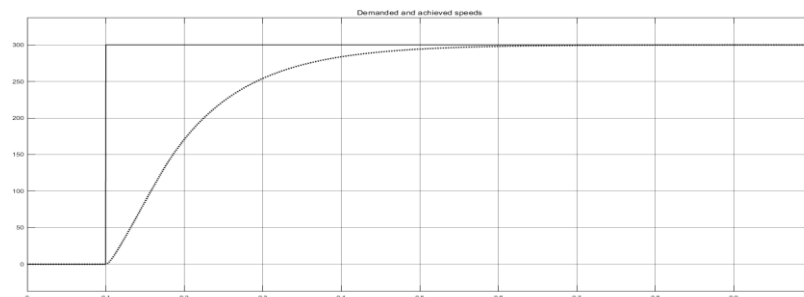


Рис.5. График изменения скорости вращения вала двигателя в зависимости от времени

С целью проверить полученные результаты на практике, была собрана система векторного управления (рис.6).



Рис.6. Собранная система векторного управления

Изменение ШИМ-сигнала на фазах электродвигателя, закон изменения момента на валу в режиме холостого хода, а также изменение скорости вращения вала двигателя в

модели векторного управления на основе тау соответствуют результатам измерения соответствующих динамических характеристик в собранной реальной системе векторного управления.

В данный момент происходит дальнейшая разработка более совершенной модели тау, с целью повышения точности моделирования и большего соответствия результатов моделирования с данными, полученными в результате проведения эксперимента с векторным регулированием реального электродвигателя.

Литература

1. А.С. Анучин. Системы управления электроприводов [Текст]: учебник для вузов/ А.С. Анучин – Москва: Издательский дом МЭИ, 2015.
2. M. S. Merzoug, F. Naceri. Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) / International Science Index International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:2 No: 9, 2008.
3. А.В. Карасев. Математическая модель прямого управления моментом асинхронного привода [Текст]: / А.В. Карасев, В.М. Смирнов // ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск.
4. Д.А. Даденков. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink [Текст]: / Д.А. Даденков, Е.М. Солодкий, А.М. Шачков // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2014. – № 11. – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
5. Ю.Н. Калачев. Векторное регулирование (заметки практика) [Текст]: / Ю.Н. Калачев // ЭФО Поставка и техническая поддержка
6. Аносов, В.Н. Векторное управление асинхронными электроприводами на основе прогнозирующих моделей : учебное пособие / В.Н. Аносов, А.А. Диаб, Д.А. Котин. — Новосибирск : НГТУ, 2017. — 175 с. — ISBN 978-5-7782-3285-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118082> (дата обращения: 09.09.2019).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПОГРУЗОЧНОГО РОБОТА С МАНИПУЛЯТОРОМ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ¹

DETERMINATION OF SERVICE AREA OF AGRICULTURAL LOADING ROBOT WITH MANIPULATOR OF PARALLEL-SEQUENTIAL STRUCTURE

Николаев М.Е. – аспирант, Несмиянов И.А. – д.т.н., профессор

Захаров Е.Н. – ст. преподаватель

ФГБОУ ВО Волгоградский аграрный университет

mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Abstract. The proposed loading robot with manipulator parallel-serial structure for loading meshes with onions, justified size and service area of a robot loader.

Key words: loading robot, manipulator, service area.

Аннотация. Предложен погрузочный робот с манипулятором параллельно-последовательной структуры для погрузки сеток с луком, обоснованы размеры и зона обслуживания робота-погрузчика.

Ключевые слова: погрузочный робот, манипулятор, зона обслуживания.

Доля ручного труда в сельском хозяйстве при уборке плодов овощной продукции составляет до 40%, а в некоторых случаях и больше. Анализ ситуации при возделывании лука-репки показывает, что в большинстве случаев его сбор осуществляется в сетки, в такой таре овощная продукция вручную грузится на транспортное средство и доставляется до потребителя[8].

Для решения проблем механизации погрузочно-разгрузочных работ и их автоматизации, разработана конструкция погрузочного робота-манипулятора параллельно-последовательной структуры, устанавливаемого на самоходное шасси[6-13].

При проектировании манипуляционного механизма необходимо определить законы изменения обобщённых координат $q(t)$, которые обеспечивают заданное перемещение захватного устройства с транспортируемым объектом[1].

Одной из задач кинематического анализа погрузочного робота, заключается в построении зоны обслуживания. Зона обслуживания формируется пространственными перемещениями точки M , в которой пересекаются оси трёх подвижных звеньев переменной длины (рис. 1). Главным критерием при формировании зоны обслуживания является заданная ширина шасси и обеспечение перемещения клещевого захвата по всей площади кузова[3].

За обобщённые координаты приняты длины звеньев манипулятора l_1, l_2, l_3 и угол β (угол наклона пространственно-параллелограммного механизма, зависящий от длины звена l_4).

Теоретическая зона возможных перемещений точки M зависит от отношения длин звеньев l_1, l_2, l_3, l_4 и от расположения их точек крепления на основании.

Для определения траектории движения точки M взяты две системы координат – неподвижная $OXYZ$ и подвижная $O_1X_1Y_1Z_1$. Для составления уравнений связи между координатами точки M , длинами звеньев и расположением их точек крепления используется зависимость между координатами двух точек в пространстве и расстоянием между ними. Эти уравнения относятся к рассматриваемой схеме в подвижной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ имеют вид[2].

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-38-90067

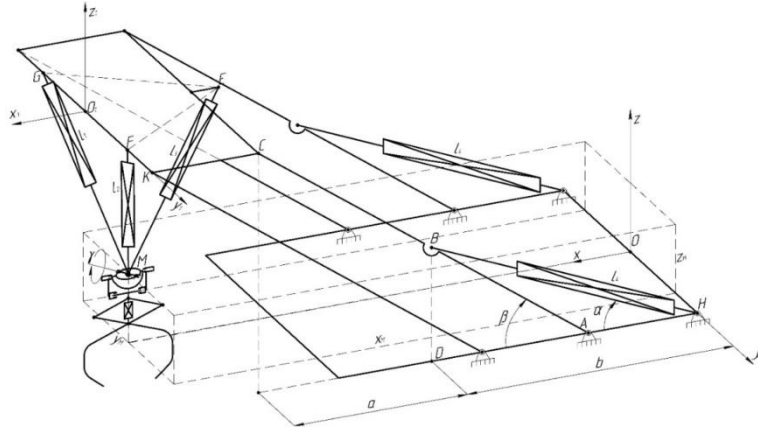


Рис.1. Кинематическая схема погрузочного робота с манипулятором параллельно – последовательной структуры

$$\begin{cases} X_{1M}^2 + Y_{1M}^2 + (Z_{1M} - Z_{1E})^2 = l_1^2, \\ (X_{1M} - X_F)^2 + Y_{1M}^2 + Z_{1M}^2 = l_2^2, \\ (X_{1M} - X_G)^2 + Y_{1M}^2 + Z_{1M}^2 = l_3^2, \end{cases} \quad (1)$$

где X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M} – координаты точки M в подвижной системе координат; l_1, l_2, l_3 – текущие значения длин звеньев манипулятора; $Y_F, X_G = Y_F \cdot \sqrt{3}$ – постоянные, в выбранной системе, координаты точек крепления звеньев манипулятора.

Решив систему (1), получаем зависимости координат точки $M(X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M})$ от длин звеньев l_1, l_2, l_3 и координат точек крепления основания манипулятора:

$$\begin{cases} X_{1M} = \frac{A - Y_F^2 + X_G^2}{2X_G} \\ Y_{1M} = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4Y_F} \\ Z_{1M} = - \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)}{16 \cdot Y_F^2} - \frac{(A - Y_F^2 - Y_G^2)^2}{4 \cdot X_G^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

Переход от подвижной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ к неподвижной $OXYZ$ определяется зависимостями:

$$\begin{cases} X_i = X_0 + \alpha_{11}X_{1M} + \alpha_{21}Y_{1M} + \alpha_{31}Z_{1M}, \\ Y_i = Y_0 + \alpha_{12}X_{1M} + \alpha_{22}Y_{1M} + \alpha_{32}Z_{1M}, \\ Z_i = Z_0 + \alpha_{13}X_{1M} + \alpha_{23}Y_{1M} + \alpha_{33}Z_{1M}. \end{cases} \quad (3)$$

где X_M, Y_M, Z_M – координаты точки M в неподвижной системе координат; X_0, Y_0, Z_0 – проекции вектора, определяющего положение начала подвижной системы координат в неподвижной системе координат; α_{sk} (направляющие косинусы) – проекция единичного вектора $\vec{i}_{1s}$ подвижной системы координат на направление единичного вектора $\vec{i}_k$ неподвижной системы координат, которая определяется скалярным произведением

$$\alpha_{sk} = \vec{i}_{1s} \cdot \vec{i}_k \quad s, k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

Для расчетной схемы (1) $X_0 = 0$; $Y_0 = Y_0$; $Z_0 = 0$,

$$\text{матрица направляющих косинусов} - \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{vmatrix} \quad (5)$$

Тогда выражения (2) для координат точки M в неподвижной системе координат принимают вид

$$\begin{cases} X_M = \frac{A - Y_F^2 + X_G^2}{2X_G} + AC \cdot \left(\frac{l_4^2 - AH^2 - AB^2}{2 \cdot AH \cdot AB} \right) + AH + CK \\ Y_M = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4Y_F} \\ Z_M = - \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)}{16 \cdot Y_F^2} - \frac{(A - Y_F^2 - Y_G^2)^2}{4 \cdot X_G^2} \right]^{\frac{1}{2}} + AC \cdot \left[1 - \left(\frac{l_4^2 - AH^2 - AB^2}{2 \cdot AH \cdot AB} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (6)$$

где $A = -l_1^2 + 0,5l_2^2 + 0,5l_3^2$.

Полученная система уравнений полностью определяет теоретическую возможную область перемещений точки M в пространстве, т.е. рабочую зону обслуживания робота погрузчика, а также позволяет сформулировать условия, исключающие попадания его в мертвое положение. Реализация алгоритма формирования зоны обслуживания захвата реализована в Mathcad.

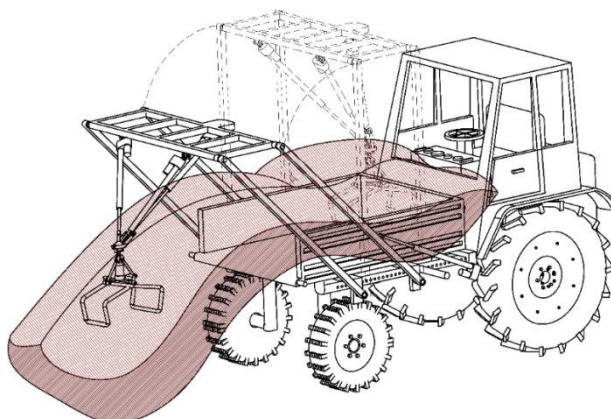


Рис.2. Рабочая зона погрузочного робота с манипулятором параллельно – последовательной структуры

Таким образом из формы рабочей зоны робота-пропольщика на рисунке 2 видно, что точка M перемещается по оси X от $\min(X) = -932.068$ мм до $\max(X) = 3079$ мм; по оси Y от $\min(Y) = -694.444$ мм до $\max(Y) = 694$ мм; по оси Z от $\min(Z) = 0$ мм до $\max(Z) = 2290$ мм., тем самым обеспечивая полное покрытие всей площади кузова по ширине шасси.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-38-90067

Литература

1. Глазунов, В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры [Текст]/В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев.-М. Наука, 1991.-95 с.
2. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством [Текст] / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, И. А. Несмиянов, Н.Н. Воробьева, // Мехатроника, Автоматизация, управление. 2016. - Т. 17. - С. 525-530.
3. К определению зоны обслуживания мобильного манипулятора - трипода [Текст] / В. М. Герасун, В. В. Жога, И. А. Несмиянов, Н.Н. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов / // машиностроение и инженерное образование. - 2013. - С. 2-8.
4. Кинематический анализ механизма параллельной структуры для работы в агрессивных условиях [Текст] / А. В. Антонов, В. А. Глазунов, А. К. Алешин, Г. В.

- Рашоян, М. М. Лактионова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018 год. - С. 3-10.
5. Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В. Моделирование зоны обслуживания погрузочного манипулятора / Материалы Международной научно-практической конференции, г.Волгоград, 31 января -2 февраля 2012г. Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С.286-290
6. Патент №2018136528 РФ, МПК⁵¹ В66С 23/44. Робот-манипулятор / Несмиянов И.А., Николаев М.Е., Воробьева Н.С., Дяшкин А.В., Дяшкин-Титов В.В., Иванов А.Г., - Оpubл. 2019.
7. Патент № 2018125787 РФ, МПК⁵¹ В66С 23/44. *Манипулятор-трипод промышленного назначения* / Несмиянов И.А., Николаев М.Е., Воробьева Н.С., Дяшкин А.В., Дяшкин-Титов В.В., Иванов А.Г., - Оpubл. 2018.
8. Тенденции развития средств механотроники, автоматизации и роботизации для синтеза новых высокопроизводительных технологий, машинное производство [текст] / З. А. Годжаев, В. К. Хорошенков, Е. И. Гончаров, Е. Н.Ильченко // фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. 2018 год. -- С. 4-16.
9. Glazunov, V.A. The control complex robotic system on parallel mechanism [Tekst]/ V.A. Glazunov, S.V. Kheylo, A.V. Tsarkov // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 174. P. 137-146.
10. Programmable movement synthesis for the mobile robot with the orthogonal walking drivers [Tekst] / V. Zhoga, V. Skakunov, I. Shamanov, A. Gavrilov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. . 135-147.
11. Processing of data from the camera of structured light for algorithms of image analysis in control systems of mobile robots [Tekst] / V. Skakunov, V. Belikov, V. Zhoga, I. Nesmianov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. . 149-158.
12. Synthesis of control algorithm and computer simulation of robotic manipulator-tripod [Tekst] / I. Nesmianov, N. Vorob'eva, V. Dyashkin-Titov, V. Zhoga, V. Skakunov, S. Terekhov, V. Egunov, F.A.H. Al-Hadsha // Communications in Computer and Information Science. 2015. . 535. . 391-403.
13. The architecture of the control system for the mobile process robot with walking movers [Tekst] / V.V. Zhoga, V.N. Skakunov, S.E. Terekhov, V.A. Belikov // International Review of Mechanical Engineering. 2017. . 11. . 337-342.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА
3К-2Г-Н В САЕ ПРОГРАММЕ KISSYS**
SIMULATION OF PLANETARY GEAR 3K-2G-H IN CAE PROGRAM KISSYS

Поликарпов А.Н. – студент, **Плясов А.В.** – канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
e-mail: plyasov-a@yandex.ru

Abstract. A method of mathematical modeling of two-stage planetary transmission 3k-2g-h with inextricably linked planetary stages with one external and internal gearing is proposed. The method is based on the use of a new principle of building models of mechanical systems as a single multidimensional system based on the program KISSys, which allows you to Refine the mathematical model and expand the design area by taking into account not only kinematic, geometric and power, but also technological and operational parameters simultaneously in four gears. The basic steps of sequential model building are described. To solve the tasks, the necessary calculation modules of KISSsoft were used. An example of a 3D model of planetary transmission 3k-2g-h, the dimensions of which are changed automatically based on calculations and set standards or manually.

Key words: transmission gear, involute gear shaping-gear transmission with planetary gear, the carrier, the pinion, the pinion, the centre wheel.

Аннотация. Предложена методика математического моделирования двухступенчатой планетарной передачи 3к-2г-н со связанными неразрывно планетарными ступенями с одним внешним и внутренним зацеплениями. Методика основана на использовании нового принципа построения моделей механических систем, как единой многомерной системы на базе программы KISSys, что позволяет уточнить математическую модель и расширить область проектирования при учете не только кинематических, геометрических и силовых, но и технологических и эксплуатационных параметров одновременно в четырех зацеплениях. Описаны основные шаги последовательного построения модели. Для решения поставленных задач были задействованы необходимые расчётные модули KISSsoft. Приведен пример 3D модели планетарной передачи 3к-2г-н, размеры которой изменяются автоматически на основании расчётов по стандартам или вручную.

Ключевые слова: передача зубчатая, формообразование эвольвентного зубчатого зацепления, передача планетарная, водило, сателлит, ось сателлита, центральные колеса.

Студенты технических специальностей создают и исследуют энергетические, технологические и транспортные машины и их сборочные узлы: электродвигатель, генератор, двигатель внутреннего сгорания, компрессор; коробка передач металлорежущих станков, механическая трансмиссия роторной линии, пресс; трансмиссия вертолѐта и автомобиля, электропривод конвейера, шарового крана, лифта, механизма подъема и перемещения крана и т.д. Для выполнения конструкторских задач требуется потратить много времени для инженерного анализа существующих решений в машинах, что возможно только при работе в коллективе на техническом проекте на предприятии или в ВУЗе. Охватить все решения не возможно из-за ограничений во времени, ресурсах и подходах к исследованию.

Для отработки методики проектирования и проверки правильности конструкторских решений на её основе следует осуществить моделирование работы полученной детали или группы, например зубчатой передачи [1], вала с подшипниками, корпуса редуктора или рамы машины. На сегодня существует достаточное количество программных продуктов: Компас Shaft 3D, Solidworks, Geartrex, Matlab, MathCAD и др., которые позволяют использовать методику проектирования по стандартам ГОСТ, ISO, DIN, AGMA, JIS, TR. Предлагается к нашему вниманию одну из программ нового

поколения KISSsys. Программа системного проектирования KISSsys в отличие от ряда существующих программ, часть из которых упоминалась выше, имеют возможность объединять данные расчетов узлов машины в систему для двухстороннего обмена между модуля автоматизированного расчёта зубчатых передач, валов и др. KISSsoft. Большая востребованность программы связана с возможностью студента, как конструктора и технолога анализировать по графикам и в анимации. Т.е. эта программа имеет статус виртуальной лаборатории для аспирантов и магистрантов.

Целью работы является разработка математической модели на базе лицензионного программного обеспечения с проверкой результатов на основании собственных методик по ГОСТ и макета планетарного редуктора по схеме 3k-2g-h [2-4].

Первое с чего начинается работа это самостоятельное создание собственными руками на листе карандашом кинематической схемы механической трансмиссии с позициями с подвижными и неподвижными осями [2, 5].

На основе подробной кинематической схемы выполняется составление дерева модели (рис. 1а) в виде с блок-функциональной схемы (диаграммы) механической трансмиссии (рис. 1б). Составление модели начинается с добавления сборочных узлов (группы соосных или несоосных валов и деталей (элементов валов)), валов с деталями (элементами), которые появляются на схеме без размеров и соблюдения положения.

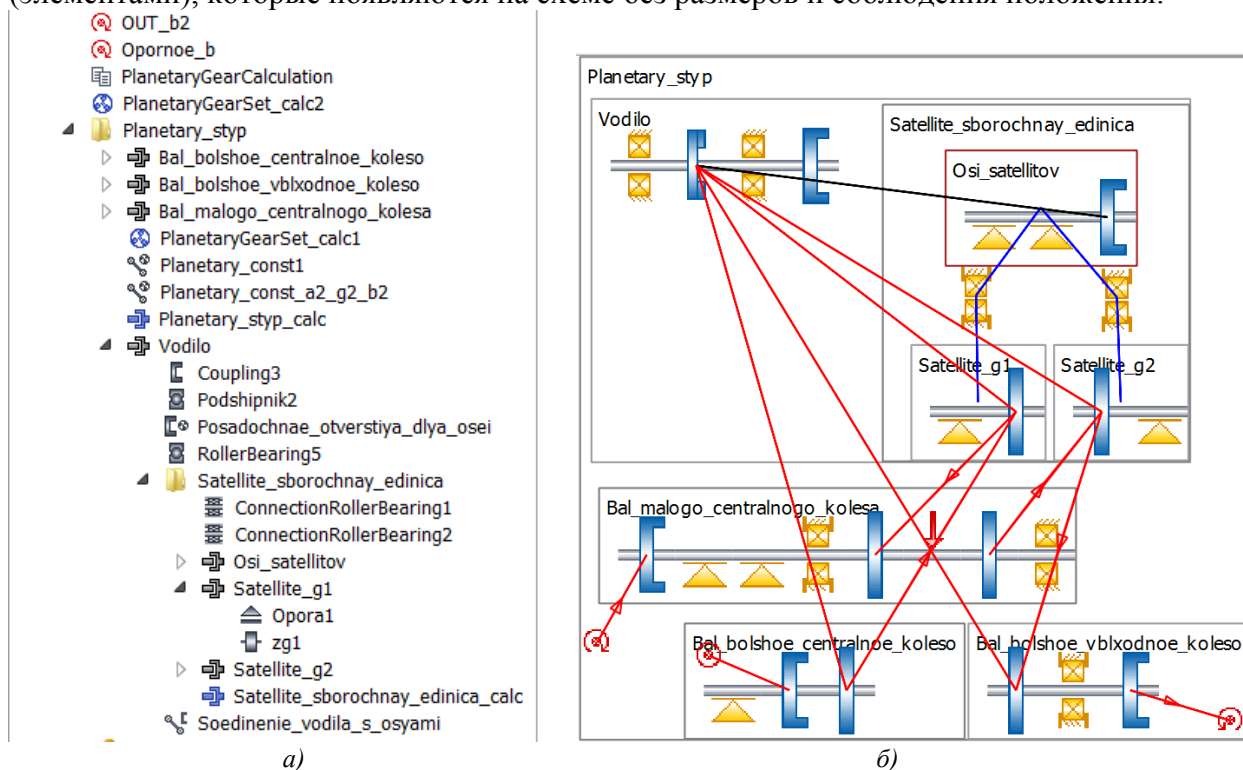


Рис. 1. Планетарный редуктор 3k-2g-h: а) дерево модели, б) блок-функциональная схема

В качестве основных деталей следует разместить на валу – это подшипники, колеса и полумуфты. Кроме этого можно уточнить и переработать расчетную схему вала (рис. 2а) или систему соосных (коаксиальных) валов (рис. 2б) в редакторе KissSoft, т.е. конструкцию вала по ступеням; систему расположения, размеры и тип подшипников; области нагрузки от сил зацепления колёс, муфты, посадки с натягом ступицы деталей. Указывается входы и выходы путем подачи и снятия движений на полумуфту входного и выходного вала. Для проверки работоспособности модели выполняется предварительно кинематический расчёт с геометрией колёс, валов и подшипников по умолчанию. Если кинематический расчёт выполняется, что проверяется по стрелкам диаграммы (см. рис. 1) и значениям крутящего момента и частоты вращения на выходном валу через диалоговое окно или окно свойств, вызываемые через контекстное меню. Выполняется серия расчётов по каждому зацеплению или группе зацеплений при геометрическом синтезе [6, 7],

конструирование валов и подбор подшипников качения из каталога разработчика.

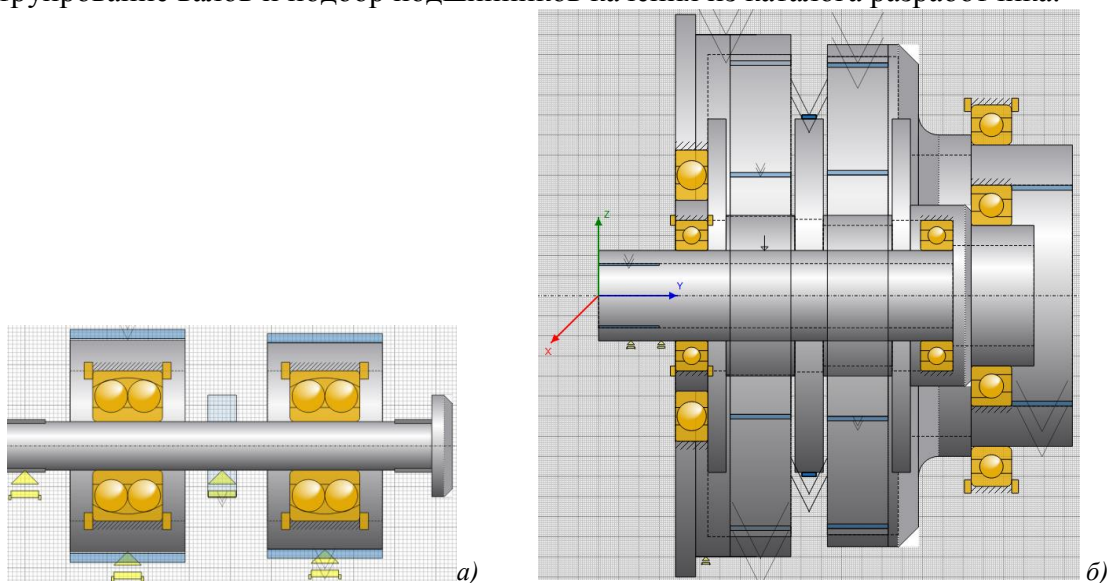


Рис.2. Расчетные схемы соосных деталей: а) ось - сателлиты, б) водило - центральные колеса

Если требуется изменения положения валов и её элементов относительно начального положения вследствие перерасчёта в первую очередь межосевого расстояния зубчатых зацеплений, то следует для удобства воспользоваться функцией Resetposition. Данная функция также позволяет назначить положение колес по углу контакта и т.д.

После создания работоспособной модели планетарного редуктора [8] (рис. 3) можно проводить расчёты: прочностной по контактным напряжениям, напряжениям на изгиб со спектрами нагружения трансмиссии; валов и подшипников; КПД на основе теплового баланса механической трансмиссии, надежности и динамики механической трансмиссии.

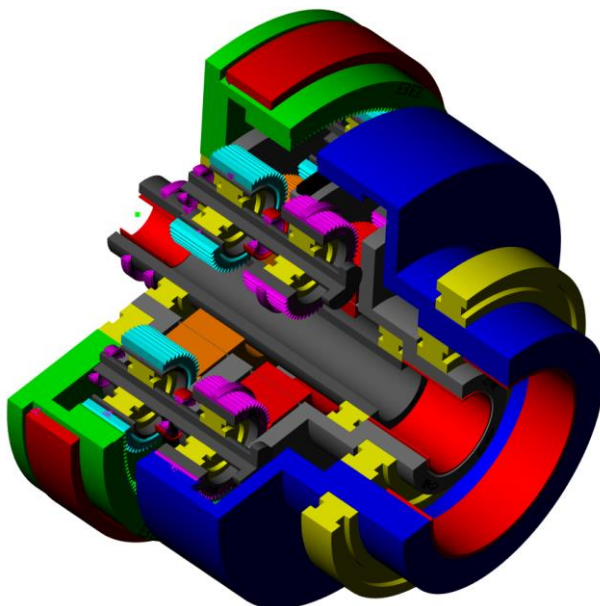


Рис. 3. Параметрическая модель двухступенчатой планетарной передачи 3k-2g-h

В помощь студенту, ученому и конструктору для понимания структуры механической трансмиссии предоставляется ряд инструментов, которые позволяют выявить ошибки в модели и сокращают объем однотипных действий. К этим инструментам можно отнести, во-первых, модель (рис. 3), в которой появляются элементы, между которыми меняются взаимосвязи и положение по мере назначения граничных условий существования модели механической трансмиссии (создания соединения между деталями: зубчатые зацепления, соединительные подшипники,

фрикционная муфта, синхронизатор) (см. рис.2).

Такой широкий спектр решаемых задач в Kisssoft удалось реализовать не только благодаря стараниям разработчиков компании, но и при тесном научном сотрудничестве с техническим советом разработчиков стандартов ISO, DIN и AGMA. В состав совета ISO входит основатель компании Kisssoft доктор Kissling. А в прошлом году компания прошла слияние, т.е. вошла в состав компаний крупнейшей корпорации Gleason.

Широкий спектр решаемых задач – это прекрасно позволяет использовать студентам и инженерам в разных отраслях машиностроения [5, 8, 9], но как говорилось ранее, нужна оптимизация действий при решении задач. Для этого предлагается использовать пользовательский интерфейс или шаблон, подготовленный разработанный лично на основе параметров механической трансмиссии и её элементов или готовый из набора. При определении коэффициента полезного действия трансмиссии следует учитывать все факторы, влияющие на результат. Интерфейс работает по схеме либо в ручном режиме либо в полуавтоматическом режиме в зависимости от опыта пользователя и этапа проектирования механической трансмиссии.

Этот интерфейс позволяет вывести все параметры, необходимые для анализа и синтеза, но и ряд параметров из них изменять для перерасчёта трансмиссии. При этом остальные параметры после перерасчёта обновляются в таблице интерфейса. Это позволяет осуществлять интенсивный поиск с исключением неправильных решений при проектировании механических трансмиссий. Так как чем больше студент и конструктор задействует инструментов, охватывающих вопросы не только проектирования, но и технологии изготовления и метрологии. Для этого используются современные стандарты, но и технические регламенты и авторские методики.

Литература

1. Планетарные передачи: Справочник/В.Н.Кудрявцев и др. М.: Машиностроение, 1977. 536с.
2. Сидоров П.Г., Ширяев И.А., Пашин А.А., Плясов А.В. Метод образования простейших планетарных механизмов//Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. Ч. II. Вып. 2. С. 3-12.
3. Двухступенчатая планетарная передача. Сидоров П.Г., Сидоров О.П., Смелов Ю.Е., Пашин А.А., Плясов А.В., Ширяев И.А. Патент на изобретение № 2402707 от 08.10 2008. Оpubл. 27.10.2010, бюлл. № 30.
4. Сидоров П.Г., Пашин А.А., Плясов А.В., Распопов В.Я. Структурные преобразования рычажно-зубчатых кинематических цепей в планетарных и многопоточных передачах / Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып 5-2. С. 151-161.
5. Сидоров П.Г., Плясов А.В. Методология проектирования главного редуктора вертолета / Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 8. С. 288-296.
6. Крюков В.А., Плясов А.В. Многопоточность в планетарных передачах 2К-Н, 3К и 3К-2Г-Н / Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. Вып. 4. С. 335-343.
7. Kryukov V.A., Plyasov A.V. REDUCING THE LEVEL OF VIBRATION IN TWO-STREAM SPUR GEAR / Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. № 9783319956299. С. 499-507.
8. Крюков В.А., Прейс В.В. Построение привода исполнительных органов роторной технологической машины с учетом уравнивания мощности / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник МНТК. Донецк: Донецкий НТУ, 2004. С. 121-124.
9. Крюков В.А., Корнюхин И.Ф. Приводы автоматических роторных и роторно-конвейерных линий // СТИН, 2000. № 11. С. 6-10.

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕФОРМИРУЮЩЕ-
ВЫГЛАЖИВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С RMR ПРОФИЛЕМ**
*ADVANCED CONSTRUCTS OF DEFORMING-SMOOTHING
TOOLS WITH RMR PROFILE*

В.А.Помыткин¹ – ученик, **Н.Р.Костин**¹ – ученик, **А.Е.Тарасов**² – ученик

¹Демиховский лицей

²Дрезненская СОШ №1

demihovskaya@mail.ru

Abstract. The experimental results for improved designs of deforming-smoothing tools with a RMR profile designed to work with large largeness's of plastic deformation are discussed. Based on an analysis of the research results, the operability new designs of deforming tools were checked and recommendations for their practical application were given.

Key words: plastic deformation, regular micro relief (RMR).

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по апробации усовершенствованных конструкций деформирующе-выглаживающих прошивок с RMR профилем, предназначенных для работы с большими натягами пластического деформирования. На основе анализа результатов исследований проверена работоспособность новых конструкций деформирующих инструментов и даны рекомендации по их практическому применению.

Ключевые слова: пластическая деформация; регулярный микрорельеф (RMR).

Перед отечественным машиностроением стоит задача разработки принципиально новых перспективных технологий, высокопроизводительного оборудования и инструмента, конкурентоспособных на мировом рынке, позволяющих выпускать изделия высокого качества и с минимальными затратами.

Применительно к методам поверхностно-пластической деформации (ППД), настоящим авторским коллективом, в работе [1] был представлен высокоэффективный способ механообработки на основе регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента. Здесь, под регуляризацией поверхности инструмента следует понимать некоторый геометрический микропрофиль, в нормальном сечении которого находится, так называемый регулярный микрорельеф – RMR (рис.1а), сформированный, алмазным выглаживателем) на поверхности рабочего элемента – твердосплавного кольца (дорна), рис. 1.

Полученные экспериментальные результаты исследований на лабораторной установке показали [1], что нанесенный RMR на рабочей поверхности дорна позволяет повысить качество обработки и снизить усилия привода станка, что в сравнении с традиционными методами ППД (без RMR) существенно повышает эффективность безлезвийной обработки. Основным объяснением такого эффекта является наличие самовозбуждаемого дросселирования смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) по канавкам RMR профиля инструмента, обеспечивающее его работу в условиях граничной смазки.

Как показала практика [1], такое дросселирование возможно только лишь при наличии двух основных условий: 1) наличие перепада давлений на торцах дорна инструмента в процессе обработки, создаваемое конструкцией установки и свойствами СОТС; 2) высота канавок RMR профиля (глубина канавок Γ_k) должна быть больше величины сминаемого слоя (высоты пластического деформирования i).

При анализе проведенных исследований [1] был сделан вывод, что RMR профиль может быть эффективно использован только при наличии вышеупомянутых условий, что не всегда может быть приемлемо для производства.

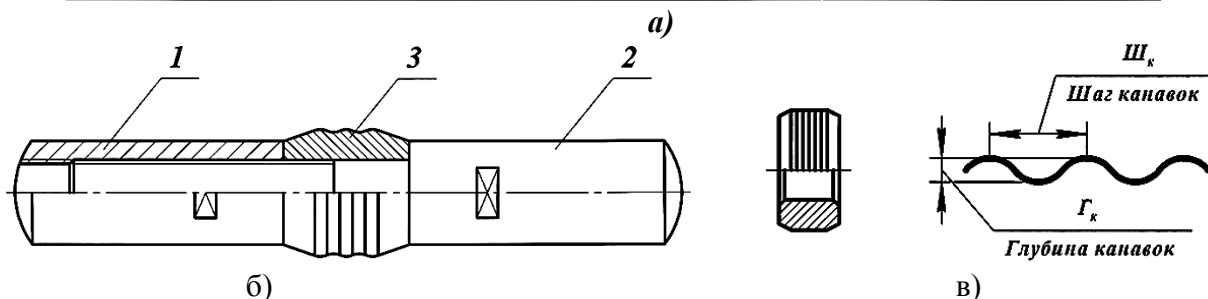


Рис. 1. Примеры сборных деформирующе-выглаживающих прошивок с РМР:
а) общий вид сборных конструкций прошивок и рабочего элемента (дорна) с РМР;
б) схема сборной прошивки (1 – стопорная гайка; 2 – оправка; 3 – дорн);
в) геометрические параметры РМР профиля дорна прошивки

Так, если будет стоять задача выполнить деформацию поверхностного слоя изделия, величина которого будет существенно превышает глубину канавок РМР профиля, то в этом случае, необходимо будет использовать несколько дорнов с РМР (с разбивкой суммарного натяга деформирования на каждый дорн для необходимого возникновения самодресселирования СОТС). Однако, в этом случае неизбежно возрастет общая длина инструмента и усложнится конструкция установки, обеспечивающая истечение СОТС. Кроме того, качество обработанной поверхности детали также может существенно ухудшиться из-за циклического воздействия очередного дорна по уже упрочненной поверхности: будет создаваться обратный эффект наклепу – перенаклеп, т. е. шелушение (разрушение) поверхностного микрослоя детали и снижение ее твердости (по аналогии с термообработкой отжигом).

Авторский коллектив, используя лабораторное оборудование кафедры «ТиОМ» Московского Политеха, синтезировал новую конструкцию деформирующе-выглаживающей прошивки с РМР профилем для работы с большими величинами натяга пластического деформирования (рис.2). Основным отличием нового инструмента от представленного в работе [1] является наличие глубоких винтовых борозд, выполненных на всей рабочей длине дорна с РМР профилем, за счет чего обеспечивается постоянное дресселирования СОТС по канавкам РМР (даже при полном перекрытии «закупоривании» канавок РМР профиля инструмента обрабатываемым материалом заготовки).

Экспериментальная проверка работоспособности нового инструмента проводилась на образцах-заготовках с высотой и наружным диаметром 40мм из латуни ЛС59-1 (НВ=1000МПа) и дюралюминия Д1Т (НВ=1430МПа), предварительно расточенных до номинального диаметра дорна 22мм. В качестве инструмента были использованы три одноэлементные деформирующе-выглаживающие сборные прошивки, отличающиеся друг от друга разным углом наклона винтовой борозды γ (рис.2). Инструментальным материалом служила быстрорежущая сталь Р6М5 с предварительно нанесенным РМР на рабочей поверхности каждого дорна ($\Gamma_k = 7\text{мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5\text{мм}$). В процессе обработки натяг пластического деформирования i изменяли в пределах от 0,08мм до 0,35мм (т. е. $\Gamma_k < i$) при скорости процесса прошивания 4м/мин, а в качестве СОТС использовали сульфокрезол.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований (рис.3 и 4) показал, что изменение усилия обработки и получаемого качества поверхности, при

прочих равных условиях, связано с изменением угла наклона винтовой борозды и физико-механическими свойствами образцов-заготовок.

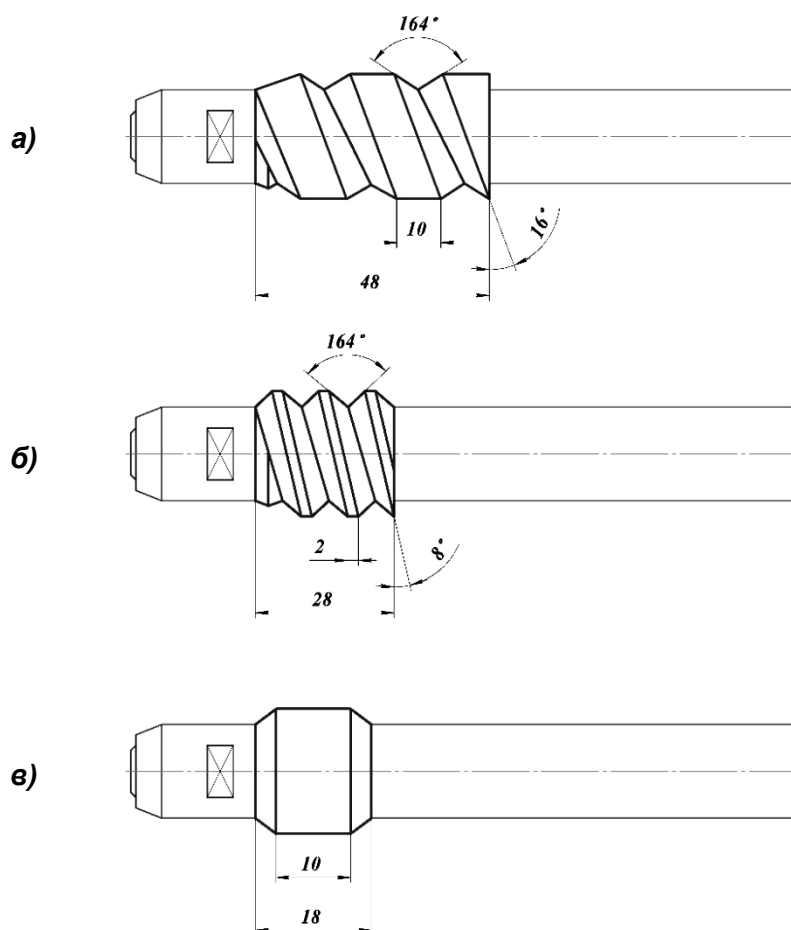


Рис. 2. Экспериментальные деформирующе-выглаживающие прошивки с РМР и различным углом наклона винтовой борозды γ : а) $\gamma = 16^\circ$; б) $\gamma = 8^\circ$; в) $\gamma = 0^\circ$

Так, из рис.3 видно, что с увеличением угла наклона винтовой линии γ на деформирующем элементе наблюдается монотонное нарастание усилий обработки для материалов с разной твердостью и свойствами, что обусловлено увеличением величины сминаемого слоя обрабатываемой поверхности.

Анализируя зависимости на рис.4 можно заключить, что чем больше угол наклона винтовой линии, тем лучше получаемое качество обработанной поверхности (меньше высота неровностей на поверхности детали), что хорошо объясняется эффектом возникновения самодросселирования СОТС по канавкам РМР профиля инструмента. Однако, при натяге пластического деформирования $i \leq 0,1\text{мм}$ (рис. 4) качество обработанной поверхности будет несколько хуже – здесь виден рост коэффициента уточнения $K_y(Ra)$ по параметру шероховатости детали ($K_y(Ra) = Ra_{\text{заг.}}/Ra_{\text{дет.}}$, где $Ra_{\text{заг.}}$ – шероховатость поверхности заготовки до обработки; $Ra_{\text{дет.}}$ – шероховатость поверхности обработанной детали), что связано с небольшой скоростью истечения СОТС (скорость движения инструмента выше скорости дросселирования СОТС по канавкам РМР профиля, большая часть СОТС сливается через переливной гидроклапан установки), т. е. работа такого инструмента может проходить в режиме очень близком к «сухому» трению.

Соответственно, при больших углах наклона γ наблюдалось улучшение качества обработанной поверхности, что связано с увеличением скорости распространения СОТС по канавкам РМР профиля за счет изменения (уменьшения) сопротивления потоку рабочей жидкости, т. е. наибольшая эффективность новых инструментов может быть

достигнута при наибольшем угле наклона винтовых борозд на поверхности инструмента.

Обобщая вышеизложенное можно сделать вывод о работоспособности разработанных новых конструкций инструментов с RMP профилем, которые могут быть рекомендованы к практическому использованию на машиностроительных предприятиях, где применяются методы обработки ППД прошивками и фильерами.

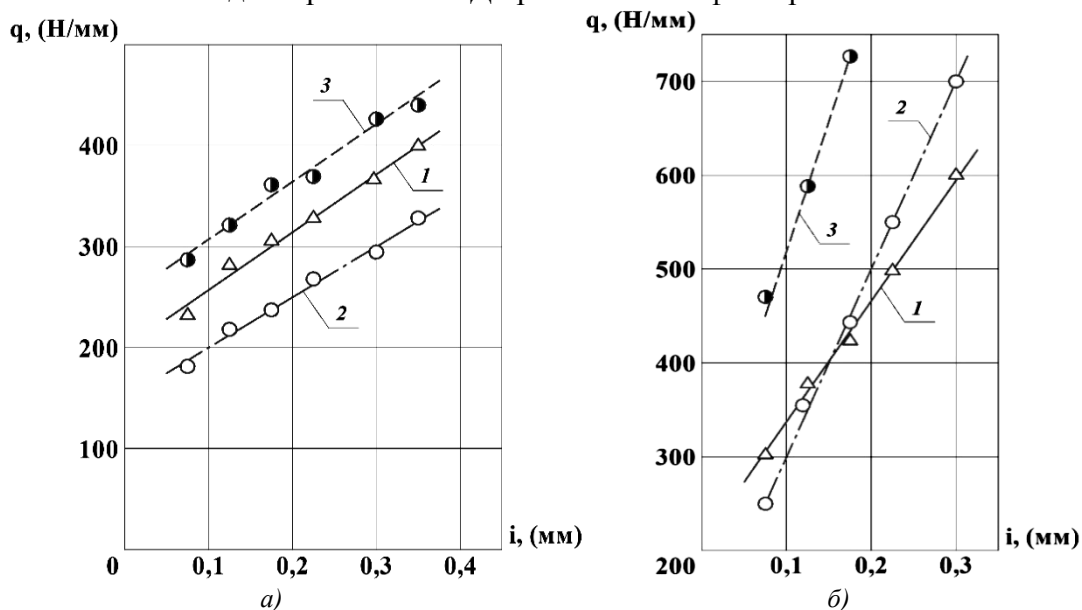


Рис. 3. Зависимость удельного усилия прошивания q от величины натяга пластического деформирования i при различных углах наклона винтовой борозды на деформирующем элементе с RMP профилем

($1 - \gamma = 0^\circ$; $2 - \gamma = 8^\circ$; $3 - \gamma = 16^\circ$): а) образцы-заготовки из ЛС59-1; б) образцы-заготовки из Д1Т

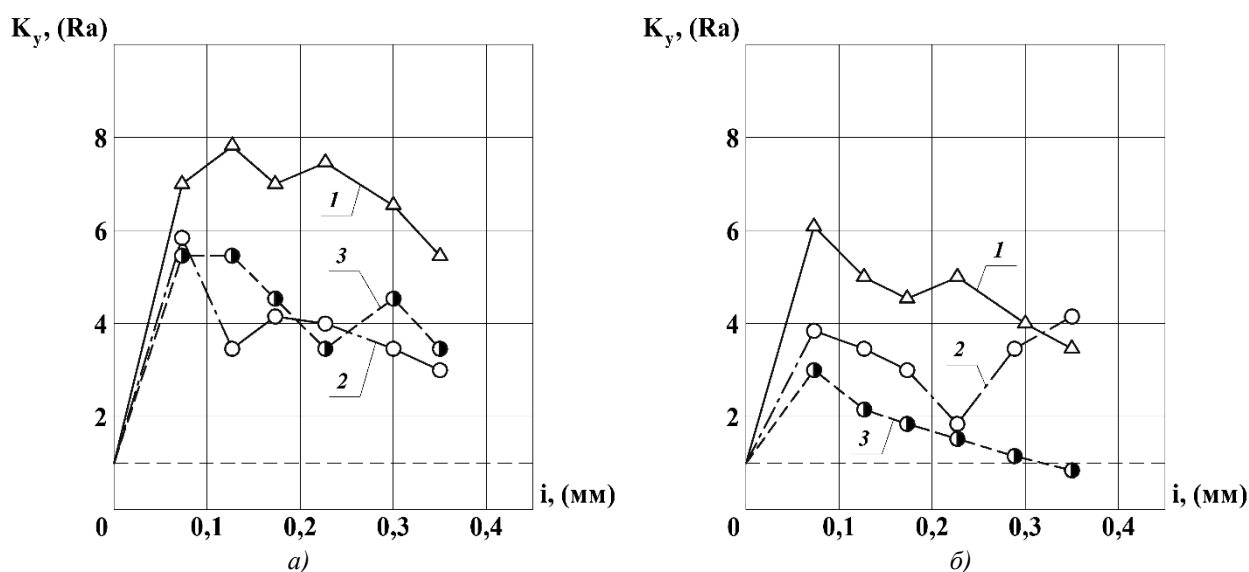


Рис. 4. Зависимость коэффициента уточнения K_y (Ra) от величины натяга пластического деформирования i при различных углах наклона винтовой борозды на деформирующем элементе с RMP профилем ($1 - \gamma = 0^\circ$; $2 - \gamma = 8^\circ$; $3 - \gamma = 16^\circ$): а) образцы-заготовки из ЛС59-1; б) образцы-заготовки из Д1Т

Литература

1. Авдеев Д.О., Евсеев Д.В., Бекаев А.А. К вопросу о влиянии регулярного микрорельефа (RMP) рабочей поверхности инструмента на качество обработанной поверхности детали // Труды XXX Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС-2018». – Москва: Изд-во «ИМАШ РАН», 2018.

**СИНТЕЗ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА С ДВОЙНЫМ ХОДОМ
ВЫХОДНОГО ЗВЕНА В ПРОГРАММЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ T-FLEX CAD**

**SYNTHESIS OF LEVER MECHANISM WITH DOUBLE STROKE OF OUTPUT
LINK IN THE PROGRAM OF PARAMETRIC MODELING T-FLEX CAD**

Рабичева Т.С. – магистр, **Мочалова Т.С.** – студентка, **Забайкин С.М.** – аспирант,
Самойлова А.С. – студентка

Руководитель: к.т.н., доц. Бровкина Ю.И.
Московский политехнический университет

Abstract. The article deals with the topical issue of modern engineering: structural and parametric synthesis of flat lever mechanisms for motion transformation. In particular, we propose a synthesized scheme of a six-lever mechanism with rotational kinematic pairs, in which the output link (rocker) performs a double stroke per revolution of the crank.

Key words: mechanism, synthesis, design, swing angle, double stroke.

Аннотация. В статье рассмотрен актуальный вопрос современного машиностроения: структурный и параметрический синтез плоских рычажных механизмов для преобразования движения. В частности, предлагается синтезированная схема шестизвенного рычажного механизма с вращательными кинематическими парами, в котором выходное звено (коромысло) выполняет двойной ход за один оборот кривошипа.

Ключевые слова: механизм, синтез, проектирование, угол размаха, двойной ход.

Актуальным вопросом современного машиностроения является разработка и исследование новых механизмов. Основным и наиболее ответственным этапом создания механизма являются структурный и параметрический синтез, т.е. проектирование схемы механизма по заданным свойствам [1].

В данной статье рассматривается параметрический синтез механизма, обеспечивающего двойной ход выходного звена. Прототипом данного механизма является механизм с двойным ходом коромысла, разработанный П.Л. Чебышевым. В отличие от прототипа [2], предлагаемый механизм содержит звено – коромысло, которое совершает за один оборот кривошипа два хода с разным угловым шагом.

Такие механизмы могут применяться для безклеевого формирования упаковки, например, коробки типа «шоу-бокс» в пищевой промышленности, в механизмах легкой промышленности, а также при создании спортивных тренажеров и элементов интерактивных макетов.

Требуется обеспечить двойной ход выходного звена с разным углом размаха за один оборот кривошипа, причем необходимо обеспечить минимальное значение угла размаха коромысла за время 1-го хода $\gamma_{51} \rightarrow 0$ и максимальное значение γ_{52} соответствующее второму ходу (рис.1), но при этом обеспечить минимальное время, затрачиваемое на угол размаха γ_{52} , и максимальное время на угол γ_{51} . Основным условием синтеза будем считать траекторию движения выходного звена.

Задача решалась методом визуального синтеза [3], в котором за исходные данные проектирования принимался максимальный угол размаха. За параметры синтеза – размеры звеньев l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 и расстояния между неподвижными осями A, D, E . Положения шарниров A и D неизменны, а координату шарнира E можно изменять лишь по оси y . Будем считать постоянными также размеры четырехзвенника $ABCD$ и угол γ между сторонами DC и DF звена 3. В отличии от механизма П.Л. Чебышева синтезируемый механизм

Механизм состоит из пяти подвижных звеньев и неподвижного звена - стойки, которые связаны одноподвижными вращательными кинематическими парами 5-го класса. По формуле П.Л. Чебышева для плоских механизмов определи число степеней подвижности:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 15 - 14 = 1$$

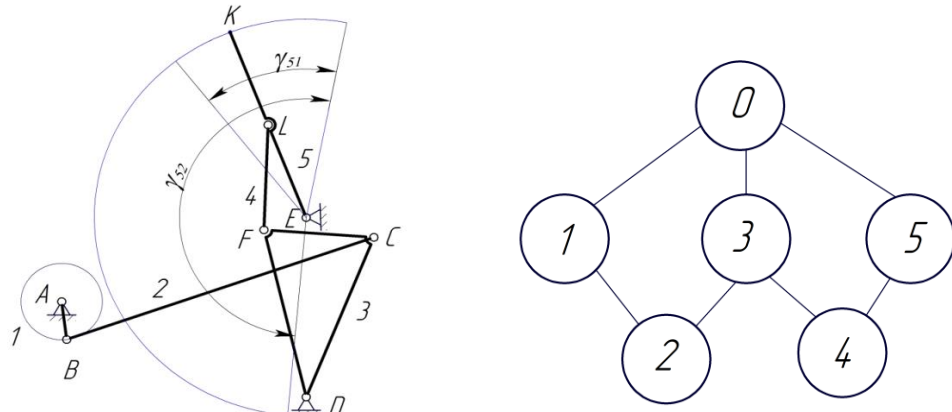


Рис. 1 Схема рычажного механизма и представление механизма в виде структурного графа
На схеме: 1- кривошип, 2-шатун, 3-коромысло, 4-шатун, 5- коромысло, 0-стойка

Структурный граф (рис. 2) механизма, отображающий все звенья и кинематические пары, имеет замкнутую двухконтурную структуру и состоит из 7 ребер, 4х двухвершинных подвижных звеньев 1, 2, 4, 5, одного трехвершинного звена 3. Полученный граф соответствует следующей структурной формуле механизма:

$$I_{(1,0)} \rightarrow II_{(2,3)}^{BBB} \rightarrow II_{(4,5)}^{BBB}$$

Аналитическое решение для данного механизма заключается в решении уравнений составленных на основании замкнутости контура [4]. Аналитическое решение позволяет более точно получить длины звеньев механизма, если уже задана кинематическая схема. Как ранее определено из графа, механизм имеет 2 замкнутых контура: $(\overline{ABCD})$ и $(\overline{DFLE})$. Уравнения, определяющие положение точки L звена 5, можно записать в виде систем уравнений.

Для первого контура:

$$\begin{aligned} \overline{AB} + \overline{BC} &= \overline{AD} + \overline{DC} \\ \begin{cases} l_{AB} \cos(\varphi_1) + l_{BC} \cos(\varphi_2) = x_D + l_{DC} \cos(\varphi_3) \\ l_{AB} \sin(\varphi_1) + l_{BC} \sin(\varphi_2) = y_D + l_{DC} \sin(\varphi_3) \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

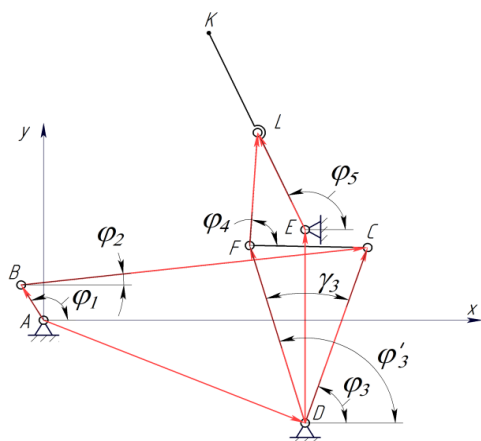
Для второго контура:

$$\begin{aligned} \overline{DF} + \overline{FL} &= \overline{DE} + \overline{EL} \\ \begin{cases} x_D + l_{DF} \cos(\varphi_3 + \gamma) + l_{FL} \cos(\varphi_4) = x_E + l_{EL} \cos(\varphi_5) \\ y_D + l_{DF} \sin(\varphi_3 + \gamma) + l_{FL} \sin(\varphi_4) = y_E + l_{EL} \sin(\varphi_5) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Последовательное решение уравнений (1, 2) определяет угол φ_5 , характеризующий движение выходного звена. Для решения данной задачи необходимо применять итерационные методы вычисления. Построение параметрической модели (рис. 2), позволяет получить решение, используя только геометрию механизма.

Для выполнения условий синтеза [1] необходимо обеспечить поворот звена 5 на угол в пределах: $150 - 200^\circ$ за короткий промежуток времени. Решение данной задачи

проводилось с использованием программы двухмерного моделирования T-FLEX CAD. Построение параметрической модели позволяет корректировать исходные данные и параметры синтеза, а также контролировать полученные результаты, используя функции анимации (за параметр анимации принимается координата φ_1 , шаг анимации равен 1). Перестроение модели происходит автоматически. Функционал программы позволяет визуализировать процесс синтеза, что делает его более понятным.



Имя	Выражение	Значение	Комментарий
группа:			
f1	121	121	угол поворота кривошипа, град
xk	get("0x2000046","X")	195.848233	координата точки K по оси x, мм
yk	get("0x2000046","Y")	264.937454	координата точки K по оси Y, мм
xd	120	120	положение шарнира D по оси x, мм
yd	50	50	положение шарнира D по оси y, мм
l1	20	20	длина звена 1, мм
l2	160	160	длина звена 2, мм
l3	90	90	длина звена 3, мм
gamma	35	35	угол коромысла, град
l4	50	50	длина звена 4, мм
l5	52	52	длина звена LE, мм
ye	92	92	положение шарнира E по оси y, мм

Рис. 2. Расчетная схема механизма и переменные, заданные в программе T-FLEX CAD

Получение требуемого закона движения в синтезируемом механизме возможно при следующих условиях: если длины звеньев 5 и 4 равны или отличаются незначительно, а расстояние DE близко по значению к длине коромысла 3. На основании этого в качестве переменных параметров модели были выбраны: длины звеньев l_4 и l_5 , а также координата, определяющая положение шарнира E. Были смоделированы случаи, когда $l_4 > l_5$; $l_4 < l_5$; $l_4 = l_5$ и $ED < l_3$; $ED > l_3$; $ED = l_3$. Размеры синтезированного механизма в трех различных вариантах соотношений длин звеньев представлены в таблице 1.

Таблица 1. Размеры синтезированного механизма

Параметр механизма	Обозначение параметра	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Длина кривошипа 1, м	l_1	0,02		
Длина шатуна 2, м	l_2	0,16		
Длина коромысла 3, м	l_3	0,09		
Угол между сторонами коромысла 3, град	γ	35		
Координата шарнира D по оси x, м	x_D	0,12		
Координата шарнира D по оси y, м	y_D	0,5		
Расстояние DE по оси y, м	y_{DE}	0,9	0,91	0,89
Длина шатуна 4, м	l_4	0,5	0,5	0,49
Длина коромысла 5, м	l_5	0,5	0,49	0,5

В процессе синтеза было установлено, что механизм невозможен при следующих условиях: если $l_4 > l_5$ и $ED < l_3$ или $ED = l_3$; а также если $l_4 < l_5$ и $ED < l_3$ или $ED = l_3$. Для остальных случаев получены решения, показывающие изменение значения угла φ_5 , в зависимости от угла поворота кривошипа (рис. 3).

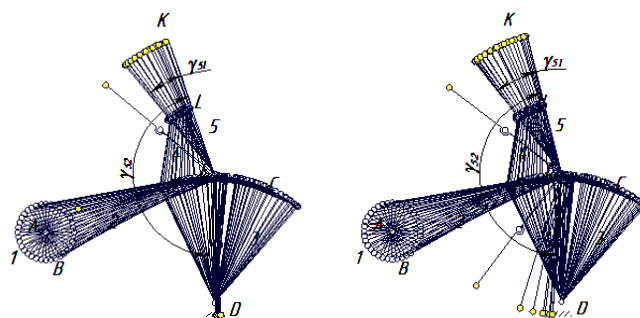


Рис. 3. Траектории движения выходного звена при разных соотношениях длин звеньев

В ходе работы было выявлено, что синтезированный механизм имеет наибольшее значение γ_{52} при $l_4 < l_5$ и $l_4 = l_5$. Наименьшее значение угла γ_{51} достигается при условии $l_4 < l_5$ и $DE > l_3$.

На рис. 4 показаны полученные зависимости изменения угла размаха коромысла 5 от угла поворота кривошипа.

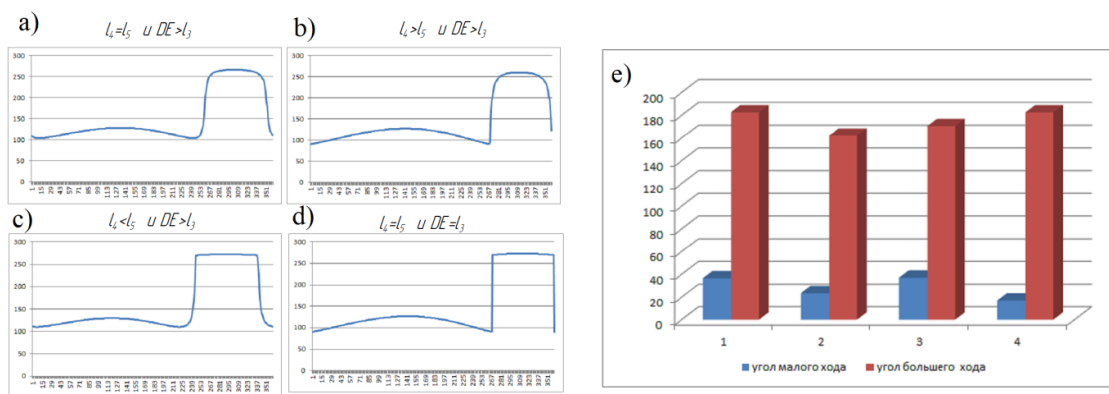


Рис. 4 Результаты синтеза шестизвенного механизма с двойным ходом коромысла («a-d») – графики изменения угла φ_5 от обобщенной координаты φ_1 , «e» – соотношения углов малого и большого ходов коромысла 5 для различных модификаций синтезированного механизма)

Таким образом, полученная структурная схема двухконтурного плоского рычажного механизма позволяет реализовать закон движения выходного звена, совершающего двойной ход с разным углом размаха за один оборот кривошипа.

Литература

1. Фролов К.В., Попов С.А., Пуш А.В., Мусатов А.К. Теория механизмов и механика машин
2. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. -640 с.
3. Теория механизмов и машин: лабораторный практикум / А.Н. Соболев, А.Я. Некрасов, Ю.И. Бровкина, А.Г. Схиртладзе. – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2016. – 160 с.
4. Теория механизмов и машин : курс лекций / Г. А. Тимофеев. — М. : ИД Юрайт, 2010. — 351 с. — (Основы наук).

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА НАКАПЛИВАЮЩЕЙСЯ ВЫБОРКИ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА STATISTICAL PROCESSING OF ACCUMULATED SAMPLE OF PHYSICAL EXPERIMENT

Рожнова М.А. – студентка

МБОУ «Гимназия №5» города Королёва (мкр. Юбилейный) Московской области
masha.rozhnova.2017@mail.ru

Abstract. Usually a statistical sample is formed after repeated measurements. To improve accuracy, the statistical sample size must be large. The accumulation of experimental data requires a lot of time. If there are several sensors in the installation, then even with one experiment it is possible to obtain a large statistical sample. The duration of the experiment is significantly reduced, but the processing time of the obtained information increases.

Key words: experiment, statistical sampling, accuracy, error of measurements.

Аннотация. Обычно статистическая выборка формируется после многократного повторения измерений. Для повышения точности объём статистической выборки должен быть большим. Накопление экспериментальных данных требует много времени. Если в установке есть несколько датчиков, то даже при одном эксперименте можно получить большую статистическую выборку. Продолжительность эксперимента значительно сокращается, но увеличивается время обработки полученной информации.

Ключевые слова: эксперимент, статистическая выборка, точность, ошибка измерений.

Цель исследования заключается в получении максимальной информации от единичного опыта измерения ускорения свободного падения в лабораторной установке с несколькими датчиками положения объекта [1]. Обычно в лабораторных работах при изучении равноускоренного движения обычно применяют установки с одним датчиком положения тела – в конце участка движения. В современном учебно-лабораторном оборудовании стали применять установки с двумя и более датчиками положения тела. При наличии трёх датчиков появляется новая возможность в накоплении статистических данных по схеме, представленной на рис.1. При свободном падении тела без начальной скорости пройденная высота H зависит от времени падения t следующим образом:

$H = \frac{gt^2}{2}$. Продолжительность падения определяется из этой формулы выражением

$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$. Для экспериментального определения величины g ускорения свободного

падения тела достаточно измерить две продолжительности падения: первая t_2 соответствует прохождению высоты H_2 от начала падения, вторая t_1 – прохождению

высоты H_1 . Это означает, что $t_1 = \sqrt{\frac{2(H_3 - H_1)}{g}}$; $t_2 = \sqrt{\frac{2(H_3 - H_2)}{g}}$. Различие Δt во

времени прохождения высот H_2 и H_1 определяется выражением

$\Delta t = t_1 - t_2 = \sqrt{\frac{2(H_3 - H_1)}{g}} - \sqrt{\frac{2(H_3 - H_2)}{g}}$. Если измерить это различие Δt во времени

прохождения высот H_2 и H_1 , то ускорение свободного падения может быть выражено

через него: $g = \frac{2}{\Delta t^2} \cdot (\sqrt{H_3 - H_1} - \sqrt{H_3 - H_2})^2$. Высоты H_3 , H_2 и H_1 измеряются лентой

измерительной, а различие Δt во времени прохождения высот H_2 и H_1 измеряется с помощью осциллографа электронного.

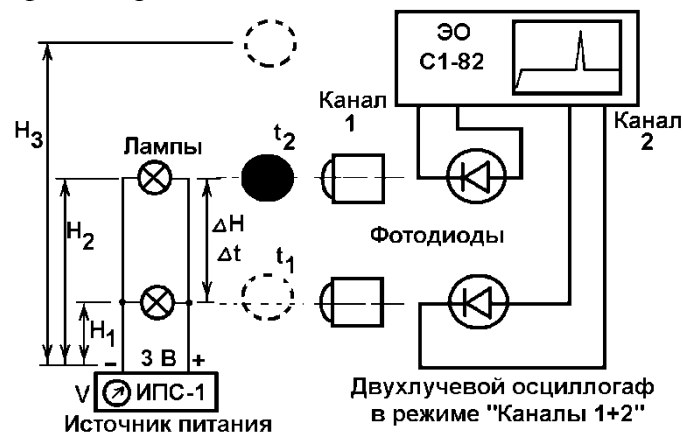


Рис.1. Схема лабораторной установки с двумя датчиками

Такая лабораторная установка даже в самом современном исполнении не смогла устранить главный недостаток первого аналога – необходимость накопления большой статистической выборки для обеспечения заданной точности определения ускорения свободного падения или иного ускорения. В школьной лаборатории была найдена самодельная установка с несколькими датчиками положения тела. Появилась идея ускорить процесс накопления статистических данных при изучении равноускоренного движения. Например, в найденной установке есть 15 датчиков положения тела. Закономерен вопрос, сколько информации можно получить от такого оборудования при единичном опыте? Для определения ускорения свободного падения тело отпускают без начальной скорости с некоторой известной высоты, а потом на осциллографе фиксируют моменты времени прохождения двух любых датчиков, расположенных на известных высотах. Основная рабочая формула остаётся прежней $g = \frac{2}{\Delta t^2} \cdot \left(\sqrt{H_3 - H_1} - \sqrt{H_3 - H_2} \right)^2$.

Высота H_3 начального положения тела задана и фиксирована в единичном опыте. Но из-за наличия множества датчиков положения тела появляется возможность выбирать различные высоты H_1 и H_2 . Задача механики оказалась связанной с задачей комбинаторики. Сколько вариантов выбора рабочей пары датчиков положения существует в лабораторной установке? Задача решается комбинаторным перебором вариантов. Датчики положения тела занумеруем сверху вниз.

Сначала задействуем первый датчик. С датчиком 1 могут работать датчики 2, 3, ..., 15. Всего возможны 14 вариантов измерений. Затем задействуем второй датчик. С датчиком 2 могут работать датчики 3, 4, ..., 15. В этом случае возможны 13 вариантов измерений. Продолжаем перебирать пары датчиков в указанном порядке, пока не дойдём до предпоследнего датчика 14. Задействуем датчик 14. С этим датчиком в паре может работать только датчик 15, поэтому возможен только один вариант измерений.

Подсчитываем общее число возможных вариантов измерений в единичном опыте, пользуясь свойством арифметической прогрессии:

$$14 + 13 + 12 + \dots + 2 + 1 = \frac{14 + 1}{2} \cdot 14 = 15 \cdot 7 = 105.$$

Вообще говоря, в установке есть 16 датчиков, но один не работает. Если его починить, то число возможных вариантов измерений в единичном опыте станет равно $15 + 14 + 13 + 12 + \dots + 2 + 1 = \frac{15 + 1}{2} \cdot 15 = 8 \cdot 15 = 120$. Добавление шестнадцатого датчика

увеличит статистическую выборку на 15 единиц. Учитывая, что при числе измерений 20-30 в устойчивых системах достигается нормальный закон распределения и достаточная точность, нет смысла проводить срочно такой ремонт. Более актуальной становится

задача обработки информации, полученной при проведении единичного опыта с большим объёмом экспериментальных данных. На рис.2. показана осциллограмма одного эксперимента с магнитно-индукционными датчиками положения падающего тела.

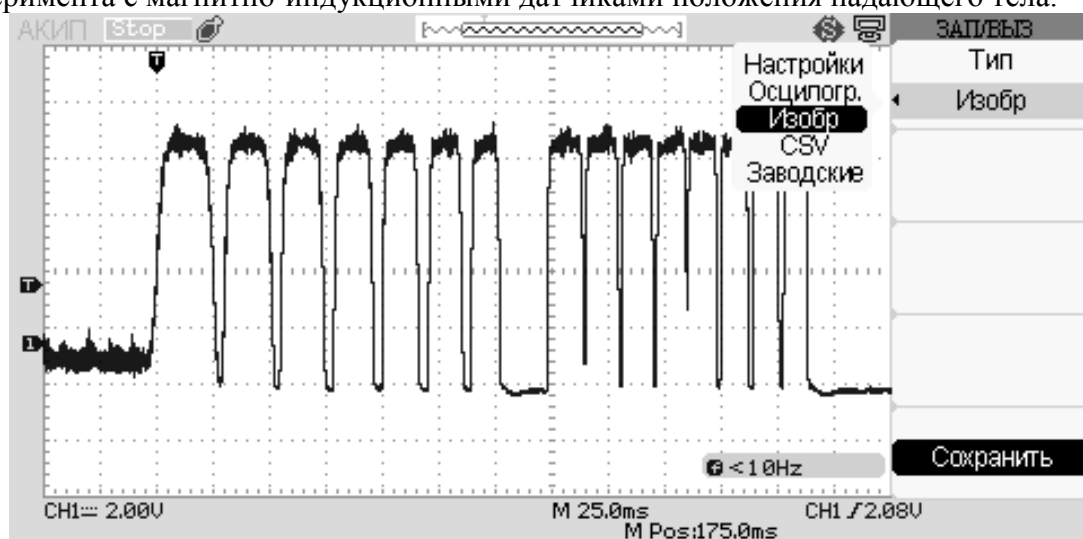


Рис.2. Осциллограмма единичного эксперимента (датчик 8 не работает)

Задача обработки большого объёма информации решается с применением компьютерной техники. Например, удобно применить текстовый табличный редактор Microsoft Excel. Этот редактор позволяет запрограммировать выполнение множества однотипных операций. Другая актуальная задача заключается в хранении полученных экспериментальных данных. Во время опыта удобно применить электронный записывающий осциллограф. датчики положения тела могут быть любого типа. Датчики соединяются с входом или входами электронного осциллографа. Датчики вырабатывают ЭДС, когда движущееся тело проходит мимо них. При отсутствии тела напротив датчика пикообразный сигнал на входе в электронный осциллограф тоже отсутствует. Лабораторная установка предполагает падение тела без начальной скорости. Когда тело достигнет верхнего датчика, на входе в электронный осциллограф появится пикообразный сигнал. Электронный осциллограф необходимо перевести в ждущий режим, тогда этот сигнал запустит горизонтальную развёртку (луч осциллографа). Когда тело пролетит мимо верхнего датчика, но ещё не достигнет нижнего, опять будет отсутствие сигнала на входе в электронный осциллограф. Однако горизонтальная развёртка электронного осциллографа (луч осциллографа) уже будет запущена, она будет регистрировать все события в течение установленного времени развёртки. Когда движущееся тело затенит второй датчик, появится второй пикообразный сигнал. Этот сигнал будет зафиксирован горизонтальной развёрткой в виде пика осциллограммы. Количество горизонтальных делений на шкале электронного осциллографа соответствует времени полёта тела от верхнего датчика до нижнего. Затем регистрируется сигнал при прохождении движущимся телом третьего датчика, потом четвёртого, и так до последнего, самого нижнего датчика. Но при обработке экспериментальных данных выбираются только два времени. Это время регистрируется и записывается для каждого набора высот H_1 , H_2 при заданной фиксированной высоте H_3 .

Запись осциллограммы в память прибора позволяет потом извлечь материал в виде графического файла, увеличивать практически неограниченно для повышения точности измерений, работать в спокойной обстановке вне лаборатории, например, дома. В учебном процессе школы или ВУЗа записанная на флэш-карту осциллограмма единичного эксперимента становится исходными данными для самостоятельной домашней работы.

При большой статистической выборке относительная ошибка стремится к нулю или к инструментальной погрешности установки. Предложенная методика проведения эксперимента с данными от множества датчиков даже при одном опыте позволяет

получить большую статистическую выборку данных. При 15 рабочих датчиках будет 105 результатов измерений за один опыт – бросание тела в установке для определения ускорения свободного падения.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	1	180	0,18	0	0	0						
2	2	240	0,24	6	30	0,03	9,5729	0,34551				
3	3	300	0,3	11	55	0,055	10,0774	0,15895	10,6998	0,62395		
4	4	360	0,36	15,8	79	0,079	9,89685	0,02156	10,0978	0,022	9,48934	0,3558
5	5	420	0,42	20	100	0,1	10,0182	0,09977	10,2121	0,13627	9,9461	0,10095
6	6	480	0,48	24,2	121	0,121	9,85212	0,06629	9,94505	0,13079	9,66637	0,17877
7	7	540	0,54	27,8	139	0,139	9,98517	0,06676	10,1002	0,02431	9,92504	0,07989
8	8	660	0,66	34,6	173	0,173	10,0673	0,14892	10,1726	0,09678	10,0627	0,21751
9	9	720	0,72	38	190	0,19	9,9723	0,05389	10,0481	0,02775	9,92966	0,08451
10	10	780	0,78	41,1	205,5	0,2055	9,9739	0,0555	10,0433	0,03257	9,93623	0,09109
11	11	840	0,84	44	220	0,22	10,0129	0,09445	10,0832	0,00738	9,9914	0,14626
12	12	900	0,9	47	235	0,235	9,95982	0,04141	10,0171	0,05876	9,92404	0,0789
13	13	960	0,96	50	250	0,25	9,8757	0,04271	9,91736	0,15849	9,81919	0,02596
14	14	1020	1,02	52,9	264,5	0,2645	9,80639	0,11202	9,83646	0,23939	9,73586	0,10929
15	15	1080	1,08	55,6	278	0,278	9,78686	0,13155	9,8129	0,26295	9,71586	0,12928
16						Среднее	9,91841	0,10281	10,0758	0,14011	9,84515	0,13318
17						Отн.ош. %		1,03651		1,39053		1,35278
18	номер да высота от высота от продолж продолжительность падения от начала до датчика, в мс											
19							от 1		от 2		от 3	

Рис.3. Копия экрана компьютера с обработкой трёх серий измерений

На рис.3. показана копия экрана компьютера с обработкой трёх серий измерений. В первой серии было 14 измерений ускорения свободного падения, во второй 13, в третьей 12. Всего в трёх сериях было 39 измерений. Казалось бы, в первой серии измерений относительная ошибка 1,04% самая маленькая, поэтому достаточно ограничиться именно этим опытом. Но надо помнить, что при малой статистической выборке уровень доверия к экспериментальным данным низок. Во второй серии измерений относительная ошибка возросла, стала равна 1,40%. Но в третьей серии измерений относительная ошибка стала снижаться, достигнув величины 1,36%. Так будет, если изучать отдельные серии измерений: первую, вторую и третью. Но если учитывать накопление статистических данных, то относительная ошибка уменьшается. В частности, если после первой серии измерений относительная ошибка была равна 1,40%, то после первой и второй 1,27%, а после первых трёх уже будет 1,32% - во всех случаях меньше, чем при отдельных сериях. Уменьшение относительной ошибки стало следствием предельной теоремы теории вероятностей и увеличения объёма статистической выборки. Например, даже по первым трём сериям измерений можно сделать следующий вывод.

Ускорение свободного падения тела, измеренное по $n=39$ реализациям, равно $g = g_{cp} \pm \Delta g_{cp} = (9,949 \pm 0,131) \text{ м/с}^2$. Так как относительная ошибка измерений $r_g = \frac{\Delta g_{cp}}{g_{cp}} = 0,0132 (1,32\%)$, то результаты опытов можно считать достоверными.

Литература

1. Дроботов В.Б., Лебедев В.В. Лабораторный практикум по физике. – МБОУ «Гимназия 5», 2007.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ НАГРУЗОК¹

NONLINEAR DYNAMICS OF CLOSED CYLINDRICAL SHELLS UNDER THE ACTION OF LONGITUDINAL AND TRANSVERSE LOADS

Салтыкова¹ О.А. – к.ф.-м.н., доцент кафедры Математика и моделирование,
Крылова² Е.Ю. – к.ф.-м.н., доцент кафедры Математического и компьютерного
моделирования,

Крысько¹ В.А. – д.т.н., заведующий кафедрой Математика и моделирование

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

²Саратовский государственный университет имени Чернышевского Н.Г.

e-mail: olga_a_saltykova@mail.ru, kat.krylova@bk.ru, tak@san.ru

Abstract. The nonlinear dynamics of a closed cylindrical shell, described by the kinematic model of the first approximation (Kirchhoff-Love) under the action of external alternating longitudinal and transverse loads, is studied. Geometric nonlinearity is described by the T. von Karman model. The resulting system of nonlinear partial differential equations is reduced to an ODE system using the Bubnov-Galerkin method in higher approximations, the Cauchy problem is solved by the 4th and 6th orders of accuracy with the Runge-Kutta method. Numerical results are compared with experimental data for longitudinal loads obtained by Zippo A., Barbieri M., Pellicano F. A qualitative agreement of the results is shown.

Key words: closed cylindrical shell, nonlinear dynamics, chaotic oscillations, Bubnov-Galerkin method in higher approximations.

Аннотация. В работе изучается нелинейная динамика замкнутой цилиндрической оболочки, описываемой кинематической моделью первого приближения (Кирхгофа-Лява) при действии внешней знакопеременной продольной и поперечной нагрузок. Геометрическая нелинейность описывается моделью Т. фон Кармана. Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных сводится к системе ОДУ с помощью метода Бубнова-Галеркина в высших приближениях, а задача Коши решается методом Рунге-Кутты 4-го и 6-го порядков точности. Численные результаты сопоставляются с экспериментальными данными для продольных нагрузок, полученных Zippo A., Barbieri M., Pellicano F. Показано качественное совпадение результатов.

Ключевые слова: замкнутая цилиндрическая оболочка, нелинейная динамика, хаотические колебания, метод Бубнова-Галеркина в высших приближениях.

Замкнутые цилиндрические оболочки широко применяются в различных инженерных сооружениях, в авиа и ракетостроении, приборостроении, медицине. В связи с этим работы по теоретическим исследованиям таких структур в мировой литературе представлены очень широко [1-3]. Однако работ по экспериментальным исследованиям замкнутых цилиндрических оболочек сравнительно не много, отметим среди них [4-6]. Целью настоящей работы является исследование нелинейной динамики замкнутой цилиндрической оболочки при действии внешних нагрузок, различных типов. В работе проведено сопоставление результатов численного эксперимента, проведенного авторами, на базе разработанной математической модели нелинейных колебаний замкнутой цилиндрической оболочки, находящейся под действием внешних нагрузок с результатами натурных экспериментов, приведенных в работах [4, 5].

Математическая модель замкнутой цилиндрической оболочки строится на основе кинематических допущений Кирхгофа-Лява с учетом геометрической нелинейности по

¹ Работа поддержана РФФ, проект № 16-11-10138

модели Т. фон Кармана. Система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, граничные и начальные условия получены из энергетического принципа Гамильтона-Остроградского [7]. Полученная система сводится к системе ОДУ по методу Бубнова-Галеркина. Кроме того, задача Коши решается методом Рунге-Кутты четвертого и шестого порядков. Система линейных алгебраических уравнений решается методом обратной матрицы на каждом шаге по времени. В работе исследуется сходимость методов и хаотическая нелинейная динамика указанных задач. На замкнутую цилиндрическую оболочку могут действовать как постоянные, так и переменные внешние нагрузки. Обозначим поперечную нагрузку через $q(x, y, t) = q_0(x, y) \sin(\omega_p t)$, где $q_0(x, y)$ – амплитуда вынуждающей силы, зависящая от координат (x, y) , а ω_p – частота вынуждающей нагрузки. $p_y(x, t) = p_0(x) \sin(\omega_p t)$ это поперечная нагрузка. При проведении численного эксперимента было проведено исследование сходимости применяемых численных методов. В методе Бубнова-Галеркина используется 13 слагаемых в разложении ряда.

Исследуем изменение пространственно-временных характеристик оболочки при изменении типа нагрузок. При действии поперечной знакопеременной нагрузки $q_0 = 0.25, \omega_p = 19.5$ изучим изменение основных характеристик (сигнал $w(0.5; 0.0; t)$, фазовый портрет $w(\dot{w})$, спектр мощности $S(\omega)$ и сечение Пуанкаре $w_t(w_{t+T})$) и форм волнообразования до (рис. 1) и после применения дополнительной продольной распределенной нагрузки. Каждая из форм волнообразования зафиксирована в моменты времени t , которые на сигнале обозначены цифрами 1, 2, 3, 4, 5. При действии поперечной нагрузки система находится в хаосе.

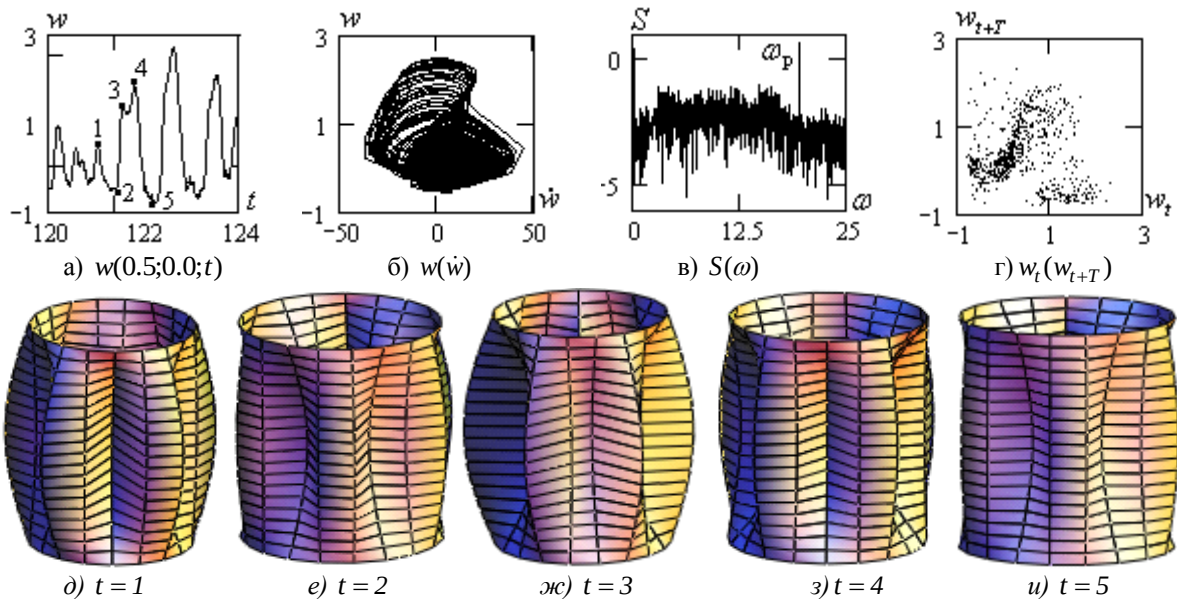


Рис. 1. Пространственно - временные характеристики системы при действии поперечной нагрузки

На рис. 1 наблюдается изменение числа полуволн во времени. Максимальные прогибы распространены на всю поверхность оболочки.

При совместном действии поперечной $q(t) = q_0 \sin(\omega_p t)$ и продольной $p_y(t) = 10 \sin(\omega_p t)$ нагрузок колебания оболочки переходят к от хаотических к гармоническим (рис. 2), что отражается на формах волнообразования оболочки (рис. 2 д-и). Число полуволн по окружной координате сохраняется постоянным, максимальные прогибы сосредоточены на границе приложения локальной нагрузки.

Вынужденная синхронизация внешних воздействий приводит к существенным изменениям пространственно-временных характеристик замкнутой цилиндрической оболочки.

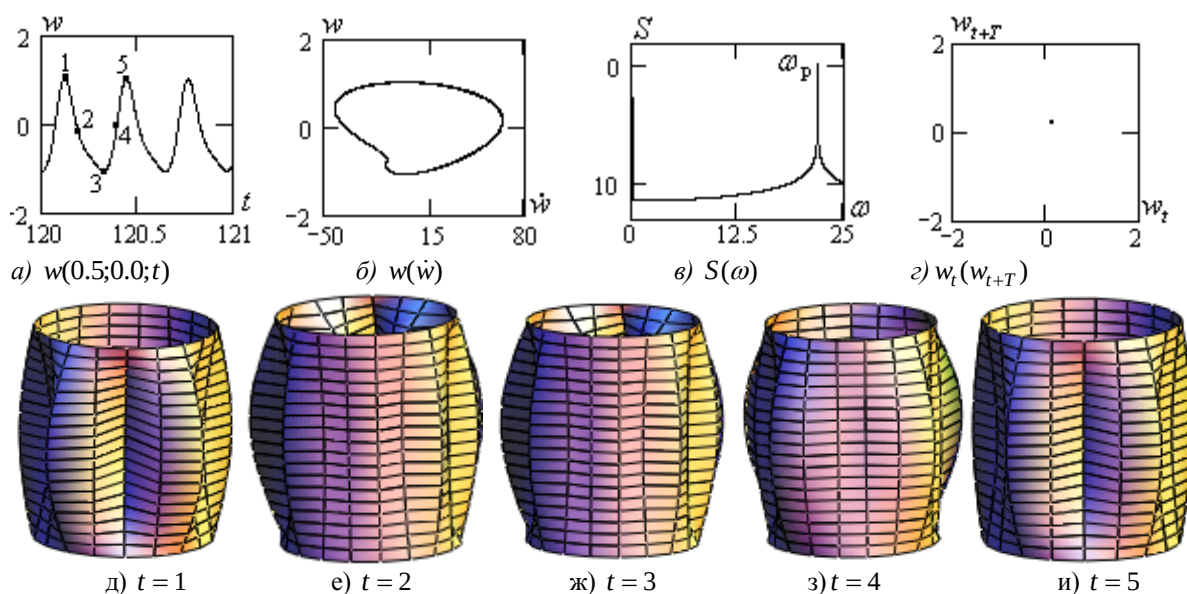


Рис. 2 Пространственно - временные характеристики системы при действии продольной и поперечной нагрузок

В работе изучается сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим. В результате сделан вывод о том, что колебания замкнутой цилиндрической оболочки переходят к хаотическим по сценарию Фейгенбаума. Зафиксирована серия бифуркаций удвоения периода колебаний оболочки. Вычислено экспериментальное значение константы Фейгенбаума составляющее $d_{\infty, \text{эксп}} \approx 4.669047$. Отличие между экспериментальным значением константы Фейгенбаума и теоретическим составляет 0,05%.

В работе [4] приводятся результаты натурных экспериментов для замкнутых цилиндрических оболочек, при действии продольных постоянных и синусоидальных нагрузок. Среди нелинейных явлений экспериментально были получены такие типы колебаний, как субгармонические и квазипериодические колебания. Результаты, полученные численно и экспериментально качественно совпадают.

Работа поддержана РФФ, проект № 16-11-10138

Литература

1. Amabili M.P.M., Review of studies on geometrically nonlinear vibrations and dynamics of circular cylindrical shells and panels, with and without fluid-structure interaction, Appl. Mech. Rev. 56 (2003) 349–381.
2. Alijani F., Amabili M., Non-linear vibrations of shells: a literature review from 2003 to 2013, Int. J. Non-Linear Mech. 58 (0) (2014) 233–257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2013.09.012>.
3. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Saltykova O.A., Vetsel S.S., Krysko V.A. (2016). Nonlinear dynamics and contact interactions of the structures composed of beam-beam and beam-closed cylindrical shell members. Chaos, Solitons & Fractals, 91, 622-638.
4. Zippo A., Barbieri M., Pellicano F. (2017). Experimental analysis of pre-compressed circular cylindrical shell under axial harmonic load. International Journal of Non-Linear Mechanics, 94, 417-440.
5. Pellicano F., Barbieri M., Zippo A., Strozzi M. (2016). Experiments on shells under base excitation. Journal of Sound and Vibration, 369, 209-227.
6. Karagiozis K.N., Païdoussis M.P., Misra A.K., Grinevich E. (2005). An experimental study of the nonlinear dynamics of cylindrical shells with clamped ends subjected to axial flow. Journal of Fluids and Structures, 20(6), 801-816.
7. Салтыкова О.А., Афонин О.А., Яковлева Т.В., Крысько А.В. Хаотическая динамика замкнутых цилиндрических оболочек при локальном нагружении, Нелинейный мир, Т. 16, №5, с.3-15

МЕТОД ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ БИРГЕРА В ЗАДАЧАХ ГИБКИХ ПЛАСТИНОК¹

BIRGER METHOD OF VARIABLE PARAMETERS FOR THE PROBLEMS OF FLEXIBLE PLATES

Салтыкова¹ О.А. – к.ф.-м.н., доц. каф. Математика и моделирование,
 Крылова² Е.Ю. – к.ф.-м.н., доц. каф. Математического и компьютерного моделирования,
 Крысько¹ В.А. – д.т.н., заведующий кафедрой Математика и моделирование,
¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
²Саратовский государственный университет имени Чернышевского Н.Г.
 e-mail: olga_a_saltykova@mail.ru, kat.krylova@bk.ru, tak@san.ru

Abstract. The paper describes the application of the Birger method of variable parameters as applied to solving problems of flexible plates taking into account physical nonlinearity. The limiting values of the physic-geometric parameter are calculated at which the calculation should be carried out with one or two non-linearities.

Key words: flexible plates, physical nonlinearity, Birger method, method of variable elastic parameters

Аннотация. В работе описано применение метода переменных параметров Биргера применительно к решению задач гибких пластин с учетом физической нелинейности. Вычислены предельные значения физико-геометрического параметра при которых расчет следует вести с одной или с двумя нелинейностями.

Ключевые слова: гибкие пластины, физическая нелинейность, метод Биргера, метод переменных параметров упругости

Существует большое количество методов решения задач теории пластин и оболочек [1-2]. Однако для решения задач теории неоднородных оболочек эти методы не всегда могут быть применены. Для решения задач теории неоднородных оболочек можно воспользоваться вариационным методом Биргера [3]. При этом очень важен вопрос выбора координатных функций, которые должны удовлетворять следующим условиям:

1. принадлежать области определения функционала.
2. должны быть линейно-независимым.
3. условие полноты координатной системы в некотором линейном сепарабельном метрическом пространстве.

В качестве координатных функций применяют тригонометрические, гиперболические и степенные полиномы.

При выводе вариационных соотношений предполагалось, что зависимости для модуля Юнга $E = E(x, y, z, \varepsilon_0, \varepsilon_i)$ и коэффициента Пуассона $\nu = \nu(x, y, z, \varepsilon_0, \varepsilon_i)$ заданы, то есть считается, согласно методу переменных параметров упругости, что конструкция имеет неоднородную структуру, где E и ν зависят от деформированного состояния в точке. В теории малых упруго-пластических деформаций модуль растяжения E и коэффициент поперечного сжатия k связаны с модулями сдвига G и объёмной деформацией K зависимостями:

$$E = \frac{9kG}{3k+G}, \quad \nu = \frac{1}{2} \frac{3k+2G}{3k+G} \quad (1)$$

Здесь полагаем, что $k = k_0 = \text{const}$.

$$G = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \quad (2)$$

¹ Работа поддержана РНФ, проект № 16-11-10138

где σ_i , ε_i - интенсивности напряжений и деформаций, соответственно.

В работе создан программный комплекс расчёта динамики неоднородных гибких пластин. В основу положен метод Бубнова в высших приближениях. Для компактности записи запишем дифференциальные уравнения в смешанной форме в операторном виде:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} = f_1(w, F), \quad f_2(w, F) = 0. \quad (3)$$

Применим к данным уравнениям по пространственным координатам метод Бубнова в высших приближениях, в результате получим для уравнений в смешанной форме систему обыкновенных дифференциальных уравнений и систему алгебраических уравнений. На каждом шаге по времени происходит итерационный процесс простых итераций метода переменных параметров упругости. Интегрирование и дифференцирование при сведении к задаче Коши производилось численно (интегрирование – по формулам Ньютона – Котеса, дифференцирование – по формулам конечных разностей второго порядка точности). Предварительно следует разбить объем пластинки прямоугольной пространственной сеткой и в каждой точке объема знать напряженно – деформированное состояние. Здесь не приводятся все зависимости данного алгоритма ввиду его чрезвычайной громоздкости [4].

Исследована сходимость метода Бубнова в высших приближениях и установлено, что для поставленной задачи необходимо учитывать 8 слагаемых в аппроксимирующих функциях для гибкой пластинки.

Пусть материал оболочки подчиняется идеальной упруго-пластической диаграмме

$$\begin{aligned} \sigma_i &= 3G_0 e_i \text{ при } e_i < e_s, \\ \sigma_i &= \sigma_s \text{ при } e_i \geq e_s, \end{aligned} \quad (4)$$

где G_0 - безразмерный параметр $G = G_0 \bar{G}$, $E = G_0 \bar{E}$, e_s - деформация текучести, σ_s - предел текучести, $\nu_0 = 0.28$; $K = 1.94 G_0$.

Большой научный и практический интерес представляют исследования по выявлению предельных значений e_s , при которых расчет следует вести с одной нелинейностью или с обеими одновременно. Рассмотрим квадратные в плане $\lambda = \frac{a}{b} = 1$ пластинки из материала, подчиняющегося идеальной упруго-пластической зависимости $\sigma_i(e_i)$ (4), значение физико-геометрического параметра $e_s = 0.098; 0.882; 1.56; 2.45; 4.8$ (рис. 1). Начальное значение коэффициента Пуассона $\nu_0 = 0.28$, $K = 1.94 G_0$. Геометрический параметр $\lambda_1 = \frac{a}{2h_0} = 10; 30; 40; 50; 70$, где $a = b$ - длина и ширина пластинки, $2h_0$ - толщина пластинки в центре.

Граничные условия соответствуют шарнирному опиранию по контуру, нагрузка равномерно распределена по всей поверхности пластинки. Решение приводим методом Бубнова при $M = N = 8$ в (5).

$$\begin{aligned} w &= \sum_{i,j}^{M,N} A_{ij} X_i^1(x) Y_j^2(y), \\ F &= \sum_{i,j}^{M,N} B_{ij} \bar{X}_i^1(x) \bar{Y}_j^2(y) \end{aligned} \quad (5)$$

Система аппроксимирующих функций

$$\begin{aligned} X_i^1(x) &= \bar{X}_i^1(x) = \sin i\pi x, \\ Y_j^2(y) &= \bar{Y}_j^2(y) = \sin j\pi y \end{aligned} \quad (6)$$

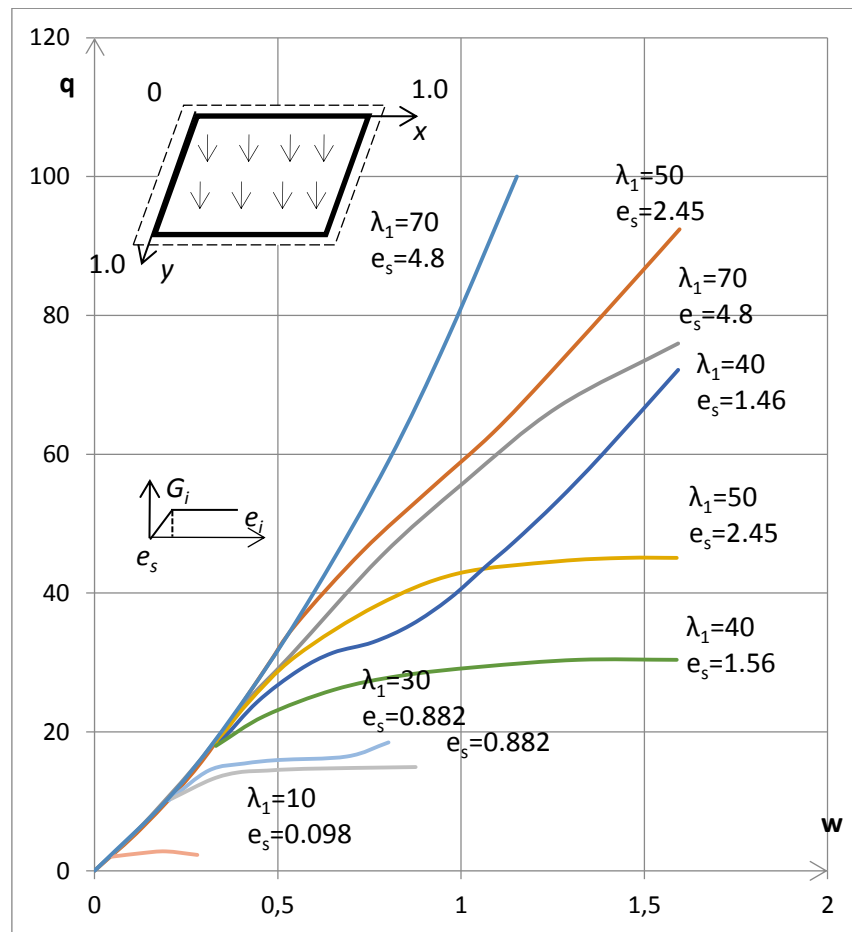


Рис. 1 Зависимости $q(w)$ при $e_s = 0.098; 0.882; 1.56; 2.45; 4.8$

На рис. 1 приведены кривые $q(w)$ в центре пластинки при вышеприведенных значениях физико-геометрического параметра, значения которого приведены на рисунке для пластинки с учетом и физической и геометрической нелинейностей. При $e_s = 4.8$ решение с учетом физической и геометрической нелинейностей полностью совпало с решением, полученным с учетом только геометрической нелинейности. Кривые на рис. 1 получены без учета разгрузки. Видно, что от решения, полученного как геометрически нелинейной задачи при $e_s < 4.8$ начинают отделяться решения, полученные с учетом только физической нелинейности и решения, полученные с учетом физической и геометрической нелинейностей. Причем в кривых (решение с учетом физической и геометрической нелинейностей) при $e_s \geq 3.526$ намечается точка перегиба, которая с уменьшением e_s становится резко выраженной ($e_s = 1.568$), при дальнейшем уменьшении e_s до $e_s = 0.882$ появляется площадка постоянной нагрузки, т.е. как бы предельная нагрузка. Эта точка перегиба в графике $q(w)$ указывает на то, что вначале геометрическая нелинейность сказывается незначительно и основную роль играет физическая нелинейность. После точки перегиба, в которой появляется разгрузка, существенную роль начинает играть геометрическая нелинейность. Из рис. 1 видно, что предельная нагрузка при $e_s = 0.882$, полученная при решении физически нелинейной задачи и физически и геометрически нелинейной задачи практически одна и та же, но картина напряженно-деформируемого состояния и распределения зон пластичности, как следствие, резко отличается одна от другой.

То есть, для шарнирного опирания квадратных пластинок при действии равномерно-распределенной нагрузки расчет можно производить: с учетом только

физической нелинейности при $e_s \leq 0.1$; с учетом физической и геометрической нелинейности при $0.1 < e_s < 6$; с учетом только геометрической нелинейности при $e_s \geq 6$.

Исследование физико-геометрического параметра e_s показало, что можно подобрать этот параметр таким образом, что получим линейную зависимость $q(w)$ будет линейной, то есть соответствующей задаче без учета геометрической и физической нелинейностей.

Работа поддержана РФФ, проект № 16-11-10138

Литература

1. Масалкин Е.Ю. Обзор методов расчета оболочек при упруго-пластических деформациях, Развитие науки и техники: Механизм выбора, 2017, 23.
2. Krysko, V. A., Awrejcewicz, J., Papkova, I. V., Saltykova, O. A., & Krysko, A. V. (2018). On reliability of chaotic dynamics of two Euler–Bernoulli beams with a small clearance. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 104, 8-18.
3. Биргер И.А. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
4. Крысько В.А. Нелинейная статика и динамика неоднородных оболочек, Издательство Саратовского университета, 1976

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО ВРЕМЕНИ ТРАЕКТОРИИ СИСТЕМЫ ТИПА «ТЕЛЕЖКА» ПРИ НАЛИЧИИ ФАЗОВОГО ОГРАНИЧЕНИЯ¹

TIME-OPTIMAL TRAJECTORIES FOR A TROLLEY-LIKE SYSTEM WITH STATE CONSTRAINT

Самыловский И.А. — к.ф.-м.н., доцент

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет космических исследований

ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Abstract. We consider time-optimal problem for trolley-like system passage to zero position under linear state constraint. We solve it with Pontryagin maximum principle usage. We construct optimal trajectories synthesis and show that, at first, every optimal trajectory has no more that one state boundary arc, and, at second, that synthesis is not simple “cut” of classical trolley-like problem synthesis.

Key words: maximum principle, state constraint, feedback control, program control.

Аннотация. Рассматривается задача наискорейшего приведения системы типа «тележка» в начало координат при наличии линейного фазового ограничения. Задача решается с использованием принципа максимума Понтрягина. Строится синтез оптимальных траекторий, показывается, что, во-первых, любая оптимальная траектория имеет не более одного выхода на фазу, и, во-вторых, синтез не есть простая «обрезка» синтеза для классической системы типа «тележка».

Ключевые слова: принцип максимума, фазовое ограничение, управление с обратной связью, программное управление.

Рассматривается следующая задача управления движением материальной точки – модификация известной задачи о наискорейшем приведении системы типа «тележка» («двойной интегратор», см. [1]) в «нулевое» положение (начало координат):

$$\begin{cases} \dot{x} = y, x(0) = x_0, x(T) = 0, \\ \dot{y} = u, y(0) = y_0, y(T) = 0, \\ y - kx + b \geq 0, \min_{u \in [-1,1]} T \end{cases}$$

Задача решается с помощью принципа максимума Понтрягина для задачи с фазовыми ограничениями (см., например, [2]), при этом устанавливается, что типичным для траекторий является наличие участка выхода на границу фазового ограничения $y - kx + b = 0$, на котором управление имеет форму обратной связи $u = ky$. Исходя из этого, устанавливается, во-первых, наличие не более одного участка выхода на границу фазового ограничения для любой оптимальной траектории системы, во-вторых, ограничения на множества точек, из которых достижимо начало координат. Таким образом, синтез в настоящей задаче не есть простая «обрезка» синтеза для классической системы типа «тележка» (в частности, границы множества точек, из которых достижимо начало координат, образованы, как правило не прямой, а параболами, формирующими классический синтез). При этом линия переключения из классического синтеза (две полупараболы, порожденные управлениями $u \pm 1$ и проходящие через начало координат) включается в синтез новой задачи и порождает последний участок оптимальной траектории, однако сама траектория может включать не одну, как раньше, а три точки переключения (выход на фазовое ограничения – сход с фазового ограничения – выход на

¹ Работа поддержана РФФ, проект № 19-71-00103

линию переключения).

Работа поддержана РФФ, проект № 19-71-00103

Литература

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983
2. Милютин А.А., Дмитрук А.В., Осмоловский Н.П. Принцип максимума в оптимальном управлении. М.: Издательство ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2004 г.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR MONITORING NON-CONTACT METHOD OF MEASUREMENT

М.О. Сеница¹, А.С. Комшин², к.т.н.,

¹ студент каф. «Метрология и взаимозаменяемость»

² профессор каф. «Метрология и взаимозаменяемость»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

e-mail: komshin_as@mail.ru

Abstract. The paper presents an approach to the control of geometric parameters of large products, including a device that helps to make measurements, control parts of complex configurations.

Keywords configuration: large dimensions, analysis, shipbuilding, shaft line, rocket engineering, measuring stand.

Аннотация. В работе представлен подход к контролю геометрических параметров крупногабаритных изделий, в том числе, представлено устройство, помогающее производить измерения, контроль деталей сложных конфигураций.

Ключевые слова: конфигурация, крупногабаритные размеры, анализ, судостроение, валопровод, ракетостроение, измерительный стенд.

Статья посвящена проблеме выполнения контроля фигур сложных конфигураций, крупногабаритных размеров, деталей требующих высокую точность и надежность.

В Российской Федерации машиностроение является ведущей отраслью и сосредоточено в крупных центрах — Москве, Санкт-Петербурге, на Урале, в Поволжье, Западной Сибири. На долю машиностроительного комплекса приходится почти 30 % от общего объема промышленной продукции. В данной публикации рассмотрены основные экономические и трудовые затраты преобладающими отраслями машиностроения [1].

В данной статье приведены доказательства эффективности разработанного измерительного стенда для данных отраслей промышленности. Для доказательства результативности стенда был проведен анализ разных отраслей машиностроения.

Экономический анализ отраслей машиностроения

Рассмотрим на примере судостроения. Больше 10% бюджета РФ перенаправляется на строительство и разработку новых военных и гражданских кораблей. Темпы роста в данной промышленности в строительстве военных судов выросли по сравнению с 2018 годом, но уменьшились в сравнении с 2017. По-другому дело обстоит с гражданским судостроением. Здесь происходит упадок производства. Упадок можно обосновать сложностью изготовления основных деталей судна. Одним из таковых является судовой вал. Валопровод представляет собой систему валов, соединенных между собой фланцами. На данный момент контроль вала происходит в разобранном виде. Проверяют сначала отдельные части вала, затем их соединяют. Сложность данной операции заключается в том, что данная операция занимает много времени и средств, также при сборке могут быть нарушены метрологические характеристики. Был произведен анализ судостроительных заводов. Ценовая политика контроля зависит от принадлежности вала, его габаритных размеров и конфигурации. Стоимость осуществления контроля варьируется от 4 до 300-х тысяч рублей. В среднем на данную операцию одного вала уходит около суток. Для военных кораблей время на проведения контроля увеличивается в несколько раз и цена за исполнения контроля будет во много раз больше, чем для гражданского судна.

Также одной из ведущих отраслей промышленности в РФ является

Ракетостроение. В космическую промышленность на сегодняшний день инвестируют немалые суммы, так как развитие данной отрасли имеет существенное значение в обороне РФ. Детали для космической промышленности сложные и уникальные. Здесь нет необходимости в серийном изготовлении, а преобладает единичное производство, которое зачастую требуется в сжатые сроки. На каждую деталь пишется индивидуальный техпроцесс, подбираются режимы и инструменты. Каждое изделие требует кропотливой точной работы. Очевидно, что при таких требованиях экономить на средствах нельзя. Основная особенность изготовления деталей заключается в том, что при запуске изделий в космос и их эксплуатации в целом нет возможности переделки и ремонта, поэтому необходимо обеспечить максимальные надежность и безотказность работы. Стоимость каждого пуска очень высока [2].

Авиационная промышленность России - крупная отрасль российского машиностроения. Детали авиакосмической отрасли отличаются высокой сложностью. Часть деталей вовсе не имеет ни одного плоского участка. Кроме того, детали отличаются тонкостенностью и высокой точностью. К таким ответственным деталям предъявляются самые высокие требования. Контроль таких сложных, пространственных, тонкостенных и точных деталей представляется еще более сложным процессом и требует много времени и средств.

Оборонный промышленный комплекс— область производства, являющаяся совокупностью предприятий, выполняющих разработку, испытание, производство и утилизацию вооружения, военной и специальной техники.

На оборону нашего государства больше половины бюджета уходит на усовершенствование и создания нового оружия и спец.техники. Для данной отрасли очень важна высокая точность и надежность изделий [3].

Измерительный стенд с бесконтактной системой проведения испытаний

Для повышения точности и надежности изделий был разработан измерительный стенд рис.1 (в дальнейшем установка).

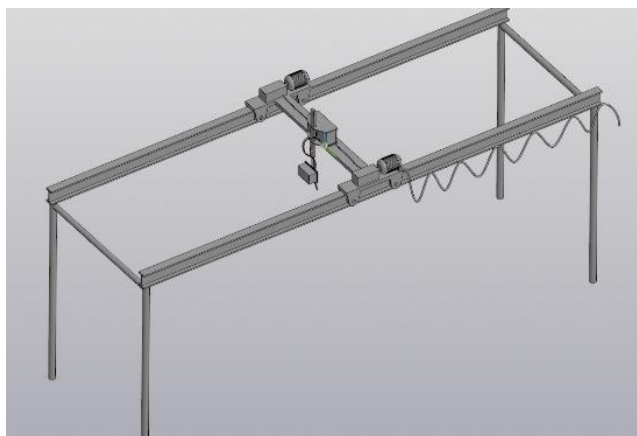


Рис.1. 3-D модель измерительного стенда

В измерительный стенд входит:

- станина, предназначенную для крепления привода вращения исследуемого вала;
- электродвигатель для вращения исследуемого вала с прибором частотного регулирования его оборотов;
- платформа с устройством крепления опорного элемента вала и механизмом его центрирования;
- каретка для размещения бесконтактного координатно-измерительного устройства, перемещаемую по направляющим с помощью электрического привода, размещённого на ней;
- направляющие для размещения и передвижения каретки;

- пульт управления стандом.

Экономический анализ ресурсов производства с использованием измерительного станда

Перспективным направлением совершенствования измерительного контроля при этом является внедрение в практику измерительного контроля в машиностроении способов бесконтактных измерительных процедур. Данная установка не только ускорит время проведения контроля, но и удешевит производство. Было проведено исследование эффективности станда. Результаты показали рис.2, что временные затраты возможно сократить на 20-30%, что вдвое ускорит работу. При этом увеличится точность контроля и повысится надежность. Уменьшится субъективная погрешность и инструментальная, так как все измерения будет выполнять станд, на котором будет установлен измерительный прибор, выбранный специально для проведения контроля необходимого параметра.

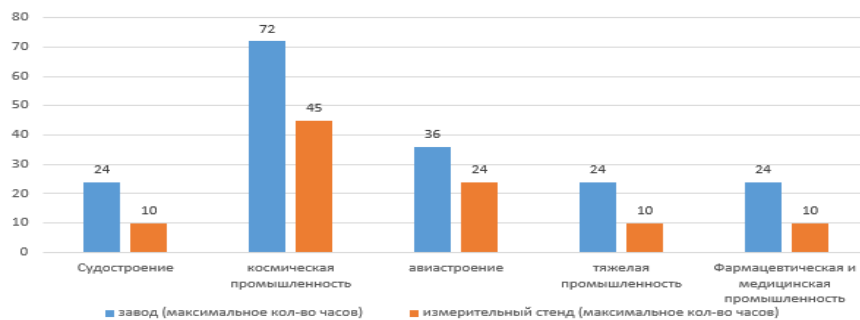


Рис.2. Анализ затрат времени на выполнение контроля при работе со стандом

Экономические затраты также уменьшаться рис.3. Прибыль увеличится, так как время на проведения контроля одного изделия сократится, следовательно, увеличится объем измеряемой продукции.

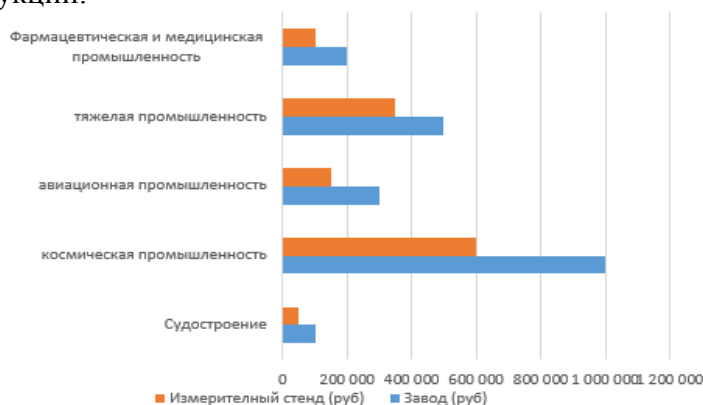


Рис.3. Анализ стоимости изделия при контроле с использованием станда

Заключение

В заключение, хочется отразить преимущества измерительного станда. Одним из главных преимуществ станда является то, что установка переносная, то есть можно измерять или контролировать параметры не только тел типа вращения, так и любые объекты. С помощью станда можно выполнять:

- измерения, контроль объекты любых размеров, сложной конфигурации, изделия любой толщины и материала;
- сокращение времени на проведения замеров;
- удешевление производства;
- повышение надежности;
- исключение систематической погрешности, благодаря бесконтактной системе измерений;

- удобства в использовании данным стендом;
- дешевая стоимость стенда.

Данный измерительный стенд не только увеличит прибыль компании, но и выведет отрасль машиностроения на новый уровень.

Список литературы

1. [Http://www.vvpnews.ru/referat2068.htm](http://www.vvpnews.ru/referat2068.htm) (просмотрено 27.09.2019)
2. <https://formung.ru/space> (просмотрено 27.09.2019)
3. Кузык.Б.Н. Оборонно-промышленный комплекс ОПК // большая российская энциклопедия. Том россия. Москва, 2004, стр. 493-497
4. <https://www.advantour.com/rus/russia/economy/machinery> (просмотрено 27.09.2019)

ПАТЕНТ НА МЕХАНИЗМ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ *THE PATENT FOR THE MECHANISM FOR WALKING MACHINE*

Скворцова А.А. – студентка

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (НИУ)
Saa2509@mail.ru

Abstract. A lambda-like mechanism of P. L. Chebyshev is known for a walking machine with an upper location of the working point, which moves along a given natural walking trajectory. The purpose of the invention is to vertically shift down any given distance of the natural walking trajectory of the working point of the connecting rod of the lambda-like mechanism. This offset is achieved by the introduction of a double hinged parallelogram, which is connected pivotally by the upper point of its vertical connecting rod to the upper working point of the connecting rod of the lambda-like mechanism in the upper common hinge Assembly. At the lower point of the vertical connecting rod of the double parallelogram, a copy of the natural walking trajectory of the foot-support is obtained, but already under the body of the machine.

Key words: hinge, lever, crank, connecting rod, toggle mechanism.

Аннотация. Известен лямбдаобразный механизм П.Л.Чебышева для шагающей машины с верхним расположением рабочей точки, которая движется по заданной природной шагающей траектории. Цель изобретения заключается в вертикальном смещении вниз на любое заданное расстояние природной шагающей траектории рабочей точки шатуна лямбдаобразного механизма. Такое смещение достигается введением двойного шарнирного параллелограмма, который соединяется шарнирно верхней точкой своего вертикального шатуна с верхней рабочей точкой шатуна лямбдаобразного механизма в верхнем общем шарнирном узле. На нижней точке вертикального шатуна двойного параллелограмма получается копия природной шагающей траектории стопы-опоры, но уже под корпусом машины.

Ключевые слова: шарнир, рычаг, кривошип, шатун, шарнирно-рычажный механизм.

Изобретение относится к области рычажных механизмов шагающих устройств. Работа над изобретением проводилась в течение пяти лет и продолжается [1-7]. Известны несколько типов механизмов для шагающих устройств. Известен механизм Кланна, описание которого приведено в патенте: US 6260862 B1, Walking device, Joseph C.Klann. Механизм Кланна состоит из двух кривошипов, двух шатунов, коромысла и корпуса. Это шестизвенный механизм. Недостатком механизма Кланна является искусственная, а не природная траектория движения опоры, имеющая сложный геометрический вид. Траектория движения опоры в механизме Кланна характерна для цепляющих механизмов и насекомых, например, пауков, а не для шагающих машин в природном понимании траектории движения стопы человека или копыта животного. Шагающая машина с механизмом Кланна не будет совершать поступательного движения, будет резко вибрировать в вертикальном и горизонтальном направлениях, создавая дискомфорт для находящихся в ней людей и подвергая детали повышенным нагрузкам. Известен механизм Тео Янсена, состоящий из двенадцати рычагов, который автор демонстрировал на своей лекции «Искусственные формы жизни» 21 мая 2014 года в рамках программы «Политех на Стрелке». Электронный ресурс: <https://theoryandpractice.ru/videos/711-teo-yansen-iskusstvennye-formy-zhizni>. Этот механизм тоже нельзя считать шагающим, потому что в траектории движения опоры отсутствует прямолинейный участок относительного перемещения, характерный для траектории стопы человека или копыта животного. Криволинейные траектории опоры характерны для насекомых, а с точки зрения механики являются цепляющими, а не шагающими. Основные назначения механизма Тео Янсена –

реклама, развлечения, шоу бизнес, обучение моделированию, изучение сложного движения, но не создание промышленных образцов шагающей техники.

Известен четырёхзвенный, если считать неподвижный корпус, лямбдаобразный механизм П.Л.Чебышева, состоящий из ведущего кривошипа 1, шатуна 2, коромысла 3 и корпуса 4, схема которого показана на рис.1 слева. Описание этого механизма приведено в книге: Полное собрание сочинений П.Л.Чебышева. Том.4. Теория механизмов. - Москва-Ленинград: Издательство Академии наук СССР, 1948 г. – С.165, в статье П.Л.Чебышева в этой книге «О преобразовании вращательного движения в движение по некоторым линиям» на стр.161-165, к которой имеется электронный режим доступа <http://www.tcheb.ru/1>. На рис.1 слева представлена кинематическая схема четырёхзвенного лямбдаобразного механизма П.Л.Чебышева.

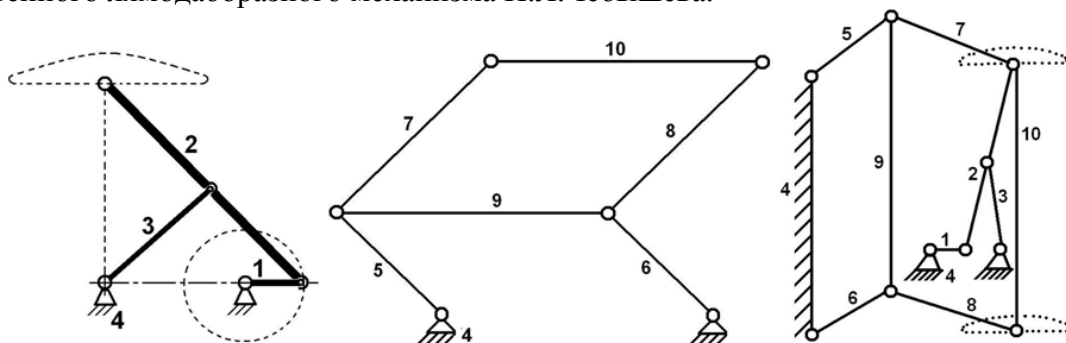


Рис.1. Аналоги, прототип и новый механизм

Этот механизм позволяет получить природную траекторию движения стопы человека или копыта животного, однако недостатком этого механизма является верхнее расположение точки шатуна, которая описывает эту природную траекторию. Нельзя перевернуть механизм для получения нижнего расположения природной траектории, потому что рабочий прямолинейный участок траектории относительного движения опоры тоже перевернётся и займёт верхнее положение над дугообразным участком переноса стопы-опоры в процессе шага.

Известен механизм двойного шарнирного параллелограмма (Электронный ресурс «Математические этюды»: <http://www.etudes.ru/ru/etudes/translation-rotation/>), схема которого показана на рис.1 в центре. Этот механизм состоит из трёх пар параллельных рычагов. Параллельные коромысла 1 и 2 закреплены одними концами шарнирно на неподвижном корпусе 7, а к другим концам коромысел шарнирно прикреплён шатун 5, параллельно которому с помощью шатунов 3 и 4 установлен на шарнирах шатун 6. Механизм двойного параллелограмма позволяет выполнять параллельный перенос траектории движения точки, потому что траектории концов шатунов 5 и 6 одинаковые.

Цель изобретения заключается в переносе траектории движения стопы-опоры шагающей машины из верхней части механизма в нижнюю часть.

Основу предлагаемого устройства составляет известный лямбдаобразный механизм П.Л.Чебышева, состоящий из ведущего кривошипа 1, шатуна 2 и коромысла 3. Шатун 2 соединяется с коромыслом 3 в центральной части с помощью цилиндрического шарнира. Ведущий кривошип 1 и коромысло 3 закреплены шарнирно на неподвижном корпусе 10. При вращении ведущего кривошипа 1 верхняя точка шатуна 2 описывает природную траекторию движения стопы человека или копыта животного. Исключительно для реализации этой траектории П.Л.Чебышевым фактически был разработан этот четырёхзвенный, если считать корпус 10, лямбдаобразный механизм. Четырёхзвенный лямбдаобразный механизм П.Л.Чебышева выбран в качестве прототипа для предлагаемого нового устройства. Недостатком лямбдаобразного механизма П.Л.Чебышева является верхнее расположение природной траектории движения стопы-опоры шагающей машины. При этом самая простая схема шагающего механизма – это один лямбдаобразный механизм, в котором опора закрепляется в верхней части шатуна в

его расчётной рабочей точке. Но на практике опора всегда должна располагаться снизу корпуса, под корпусом, причём значительно ниже корпуса шагающей машины. Получилось противоречие. С одной стороны, получена природная траектория движения стопы-опоры. С другой стороны, природная траектория движения стопы-опоры не может быть реализована на практике, потому что находится выше самой шагающей машины. Перенос природной траектории движения стопы-опоры ниже шагающей машины – это далеко не тривиальная задача. Например, в стопоходящей машине П.Л.Чебышева, показанной на Всемирной выставке в Париже в 1895 году, смещение природной траектории движения стопы-опоры на верхней точке шатуна лямбдаобразного механизма вниз выполнено добавлением ещё одного такого же лямбдаобразного четырёхзвенного механизма с последующей синхронизацией движения двух дополнительных удлиняющих вертикальных шатунов. Если учесть, что шагающая машина должна иметь не менее четырёх опор, то необходимы четыре лямбдаобразных механизма, четыре вертикальных удлиняющих шатуна и пара связей этих шатунов для устранения дополнительной лишней степени свободы механизма. В новом устройстве предложено отказаться от второго лямбдаобразного механизма как необходимого дополнения к первому такому же механизму. В новом устройстве реализован перенос рабочей природной траектории стопы-опоры шагающей машины из верхней части машины в нижнюю часть машины с помощью двойного параллелограмма, показанного на рис.1 и предназначенного именно для этой цели. На рис.1 справа показана кинематическая схема предлагаемого механизма шагающей машины. Верхний шарнир шатуна 4 двойного параллелограмма соединен с верхней рабочей точкой шатуна 2 лямбдаобразного механизма, которая описывает природную траекторию стопы-опоры шагающей машины. Одинаковые шатуны 5 и 6 одними концами шарнирно соединены соответственно с верхним и нижним концами шатуна 4, а другими концами также шарнирно соединены соответственно с шатуном 7. Шатун 7 имеет такие же размеры, как шатун 4. Пары противоположно расположенных шатунов 4 и 7, 5 и 6 образуют первый шарнирный параллелограмм, считая от ведущего лямбдаобразного механизма с рычагами 1, 2, 3. К верхнему концу шатуна 7 и одновременно к левому концу шатуна 5 шарнирно крепится коромысло 8. Шатуны 5, 7 и коромысло 8 могут свободно вращаться друг относительно друга вокруг общих шарнирных осей. Точно также к нижнему концу шатуна 7 и к левому концу шатуна 6 шарнирно крепится коромысло 9. Шатуны 6, 7 и коромысло 9 могут свободно вращаться друг относительно друга вокруг общих шарнирных осей. Два одинаковых коромысла 8 и 9 образуют верхнюю и нижнюю пару второго шарнирного параллелограмма. Правой и левой сторонами второго шарнирного параллелограмма являются шатун 7 и неподвижный корпус 10, на котором установлена пара шарниров на таком же расстоянии друг от друга, как и на шатуне 7. Лямбдаобразный механизм формирует на верхней точке шатуна 2 природную траекторию стопы-опоры шагающего механизма, а двойной шарнирный параллелограмм, составленный из шатунов 4, 5, 6, 7, коромысел 8 и 9, корпуса 10 и соответствующих шарнирных связей, переносит эту природную траекторию стопы-опоры шагающей машины в нижнюю часть шагающей машины на нижнюю точку шатуна 4 двойного шарнирного параллелограмма. Нижняя точка шатуна 4 двойного шарнирного параллелограмма полностью повторяет движение верхней точки шатуна 4 по свойству двойного шарнирного параллелограмма, то есть также описывает природную траекторию стопы-опоры шагающей машины. Величина смещения природной траектории шага стопы-опоры шагающего механизма определяется исключительно длинами шатуном 4, 7 и расстоянием между шарнирами на корпусе 10 – все они должны быть одинаковыми. Длины одинаковых шатунов 5, 6 и одинаковых коромысел 8, 9 определяют смещение природной траектории шага в продольном направлении шагающей машины, поэтому не являются критичными для достижения цели предлагаемого устройства, то есть для смещения природной траектории шага стопы-опоры вниз, под корпус шагающей машины.

Существенным признаком предлагаемого устройства является совмещение

лямбдаобразного механизма П.Л.Чебышева с двойным параллелограммом, позволяющее получить новый технический результат – перенос природной траектории шага стопы-опоры из верхней части механизма вниз на любое расстояние.

Технический результат заключается в точном переносе природной траектории движения стопы человека или копыта животного из верхней части лямбдаобразного четырёхзвенного механизма П.Л.Чебышева в нижнюю часть механизма на произвольное расстояние, которое определяется конструктивными требованиями технического задания.

Формула изобретения.

Механизм шагающей машины, содержащий механизм формирования траектории шага стопы-опоры в верхней части механизма, *отличающийся* тем, что, с целью смещения траектории шага стопы-опоры из верхней части механизма в нижнюю часть механизма, в него введён двойной шарнирный параллелограмм, два шарнира которого установлены на одной вертикали на общем корпусе с механизмом формирования траектории шага стопы-опоры на расстоянии, равном длине двух подвижных вертикальных шатунов двойного параллелограмма, а рабочая точка механизма формирования траектории шага стопы-опоры шарнирно соединена с верхним концом крайнего вертикального шатуна двойного параллелограмма.

Литература

1. Сворцова А.А. Новый рефлекторный шагающий тренажёр // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Десятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных 26-28 октября 2016 г. – Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 190 с. – С.24-25. – ББК 30.1 Н 34.
2. Сворцова А.А. Новый шагающий тренажёр // Сборник тезисов Второй Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина, материалы и технологии 21-го века» 20-23 сентября 2017 г. Отв. Ред. А.В.Герасимов (Электронный ресурс). – Казань: К(П)ФУ, 2016. – С.77.
3. Сворцова А.А. Новый рефлекторный шагающий тренажёр // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2016». Тезисы. – М.: Московский авиационный институт (МАИ), 16-18 ноября 2016 г. – 739 с. – С.470-472. – ISBN 978-5-383-01064-8.
4. Сворцова А.А. Бифуркации в движении привода шагающей машины П.Л.Чебышева // 18-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2017». Сборник тезисов докладов. – М.: Московский авиационный институт (НИУ МАИ), 2017. – 1479 с. – С.999. – ISBN 978-5-90363-115-5.
5. Сворцова А.А. Учебное численное исследование бифуркаций в шагающем механизме П.Л.Чебышева и шагающем рефлекторном тренажёре // Материалы XXVIII Международной конференции "Современные информационные технологии в образовании". Научно-методическое издание / Редакционная группа: Алексеев М.Ю. и др. - Троицк-Москва, 27 июня 2017 г. - ISBN 978-5-9907219-4-4 - Электронный ресурс: http://ito.bytic.ru/uploads/files/conf_2017.pdf - С.48-50.
6. Сворцова А.А. Рефлекторный шагающий тренажёр // 28-я Международная инновационно ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2016, Институт Машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, 7-9 декабря 2016 г. - Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления - 459 с. - С.393-396.
7. Сворцова А.А. Механизм шагающей машины. Заявка на патент на изобретение №2017138076/11(066514) от 01.11.2017 г. (положительное решение ФИПС и РОСПАТЕНТ от 01.09.2019 г. о выдаче патента на изобретение).

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ
МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ**
*TOPICAL ISSUES OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF THE MECHANICAL
EQUIPMENT OF PORTAL CRANES*

Стоянцов Н.М.¹ – магистрант, **Ганшкевич А. Ю.**¹ – кандидат технических наук, доцент,

Александрова О.А.² – специалист-обследователь грузоподъёмных машин

¹Московская государственная академия водного транспорта – филиал ФГБОУ ВО

«Государственный университет морского и речного флота имени адмирала

С.О. Макарова»

²ООО «Кранком экспертиза»

gansalex@mail.ru

Abstract. The article discusses the problems encountered by experts when carrying out vibration diagnostics of mechanical equipment of cranes and proposes some methodological techniques to solve them.

Key words: vibration diagnostics, portal crane, mechanical equipment, time-frequency analysis.

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются эксперты при проведении вибродиагностики механического оборудования кранов и предлагаются некоторые методические приёмы для их решения.

Ключевые слова: вибродиагностика, порталый кран, механическое оборудование, частотно-временной анализ.

Одним из наиболее распространённых методов вибродиагностики машин и оборудования является спектральный анализ на основе преобразования Фурье, который реализуется в виде анализа прямого спектра или спектра огибающей вибросигнала [1]. Из-за особенностей работы грузоподъёмных кранов, возникает целый ряд факторов, снижающих надёжность и эффективность такого спектрального анализа [2], [3]. К этим факторам относятся:

- повторно-кратковременный режим работы, следствием которого являются вибросигналы, продолжительность которых зачастую недостаточна для выявления дефектов;

- значительное относительное время работы механизмов в переходных режимах (разгон и торможение);

- работа механизмов крана с различной нагрузкой из-за вариативности массы поднимаемых грузов и смены направлений движения, следствием чего является нестабильность частоты вращения двигателя;

- близкое расположение различных механизмов в машинном отделении крана, сигналы от которого накладываются на сигнал от диагностируемого узла;

- перемещение исследуемого оборудования в пространстве при работе крана, которое вызывает дрейф сигнала акселерометров вследствие связанных с перемещением ускорений и изменения пространственного положения осей.

Воздействие указанных факторов приводит к возникновению ряда проблем, связанных с выявлением и идентификацией дефектов на основе анализа частотных спектров. В работах [2], [4] было показано, что решение указанных проблем может быть получено применением методов частотно-временного анализа, например кратковременного преобразования Фурье (short time Fourier transform, далее – STFT) [2], и применением фильтров, позволяющих устранять тренд и шумовую составляющую сигнала [4]. Краткий обзор предлагаемых решений представлен в таблице 1.

Таблица 1. Проблемы вибродиагностики крановых механизмов и методы их решения

Фактор	Диагностическая проблема	Метод решения
Повторно-кратковременный режим работы и значительное относительное время работы механизмов в переходных режимах	Отсутствие явных пиков в частотном спектре	Контроль взаимного расположения частотных пиков на основе анализа частотно-временного спектра
Работа механизмов крана с различной нагрузкой	Смещение частотных пиков дефектов с наложением их друг на друга	Анализ отдельных стадий работы механизмов, выделяемых из общего временного сигнала на основе анализа частотно-временного спектра
Близкое расположение различных механизмов в машинном отделении крана	Появление в спектре частотных пиков не только от диагностируемого механизма	Анализ отдельных участков временного сигнала, соответствующих работе конкретных механизмов на основе анализа частотно-временного спектра
Перемещение исследуемого оборудования в пространстве при работе крана	Появление в спектре частотных пиков, соответствующих колебаниям несущей конструкции крана	Применение фильтров высоких частот

Достижение высокой эффективности диагностики должно обеспечиваться согласованным применением предлагаемых решений в рамках единой методики. На разработку такой методики и направлено исследование, промежуточные результаты которого приведены в настоящей статье.

Разработка и апробация методических проёмов диагностирования проводились в рамках проведения экспертизы промышленной безопасности порталных кранов, расположенных в первом грузовом районе ПАО «Северный порт», г. Москва. В эксперименте применялись акселерометры ВС 201 (№ 49619-12 в реестре средств измерений РФ), и аналого-цифровой преобразователь ZET 220 производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (ЗАО «ЭТМС»). Подготовка к анализу и анализ результатов проводились с применением программного комплекса Matlab 2018b.

В общем случае вибродиагностика условно может быть разделена на три этапа: подготовительный, измерительный и аналитический. В настоящей статье представлены некоторые методические рекомендации для аналитического этапа, сформулированные авторами на основании анализа опыта применения вибродиагностики оборудования порталных кранов.

В состав аналитического этапа рекомендуется включать следующие работы:

1. Выявление и устранение тренда.
2. Определение интервалов различных режимов работы узла или агрегата.
3. Определение частоты возбуждающей силы.
4. Построение и первичный анализ спектров для характерных режимов
5. Очистка сигнала от шумов.
6. Уточнение частот характерных дефектов с учетом частоты возбуждающей силы.
7. Фильтрация сигнала с учетом частот характерных дефектов.
8. Преобразование сигналов виброускорения в виброскорость и виброперемещение.
9. Построение огибающей сигнала.
10. Построение и анализ спектров Фурье преобразованных сигналов.
11. Формирование выводов по результатам диагностирования.

Для построения тренда обычно используют метод скользящего среднего. Однако у него имеется один существенный недостаток – ширина и форма окна задаются априори, независимо от формы сигнала. Для рассматриваемого случая, когда процессы образующие тренд являются нелинейными и нестационарными, наиболее целесообразным представляется применение эмпирической модовой декомпозиции (empirical mode decomposition, далее – EMD). EMD представляет собой адаптивную итерационную

вычислительную процедуру разложения исходных данных на эмпирические моды или внутренние колебания [5], что позволяет использовать его в качестве полосового фильтра для удаления тренда и высокочастотного шума. На рис. 1 приведены ЧВС вибросигнала с датчика, установленного на подшипниковой опоре вала-шестерни механизма изменения вылета стрелы крана «Альбрехт» 10-32. На рис. 1,а показан ЧВС после удаления тренда методом скользящего среднего, на рис. 1,б – после фильтра на основе EMD.

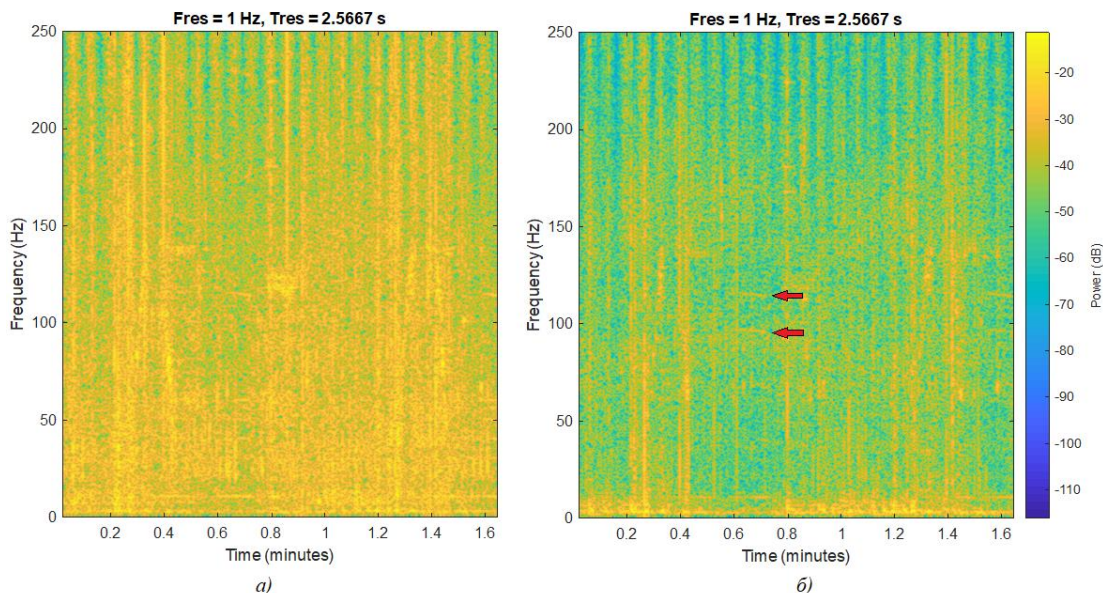


Рис. 1. Сравнение результатов фильтрации сигнала разными методами

Видно, что ЧВС на рис. 1б менее зашумлён, что позволило выявить субгармонику частоты зубозацепления (отмечены красными стрелками), свидетельствующую об увеличенном зазоре в зубчатой паре. На рис. 1,а эта гармоника маскируется шумом.

На рис. 2 приведены частотный и ЧВ спектры вибросигнала с опорного подшипника машинного отделения, снятого при работе механизма подъёма. При съёмке выполнялись двукратные подъём и опускание груза.

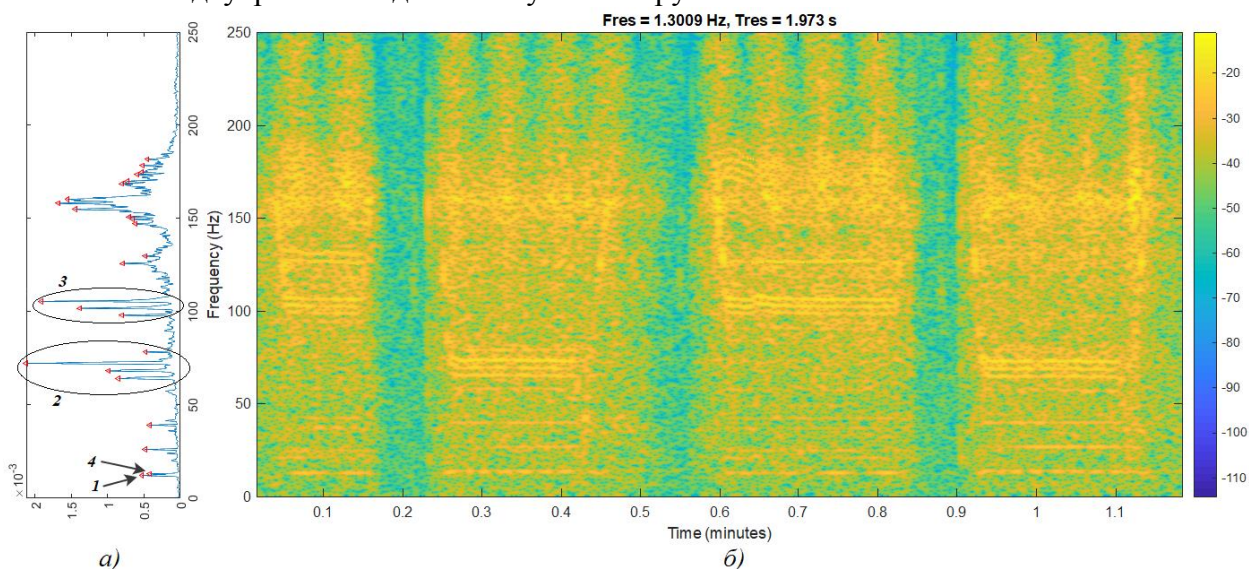


Рис. 2. Анализ частотного и частотно-временного спектров

Частотный спектр на рис. 2,а получен из временного сигнала путём быстрого преобразования Фурье, ЧВС (рис. 2,б) – методом STFT. На частотном спектре (рис. 2,а), имеются выраженные пики на ряде частот. Однако, наряду с ярко выраженными пиками на спектре имеются вершины с пологими склонами и множественными близко расположенными пиками, а также вершины с рядом дополнительных пиков на склонах.

Такая картина не позволяет однозначно интерпретировать полученный результат. Например, пик 2 на рис. 2,а расположен на склоне пика 1, такая картина может свидетельствовать как о наличии двух независимых процессов, так и о наличии гармоник одного процесса. Анализ ЧВС позволяет увидеть, что пики 1 и 4 соответствуют разным стадиям работы – подъёму и опусканию груза. Дальнейшие расчёты показали, что пик 1 соответствует частоте вращения электродвигателя на подъём (12,1 Гц), а пик 4 – на спуск (13,3 Гц). Полученные значения частоты возбуждающей силы в дальнейшем используются для расчёта частот характерных дефектов. Аналогичным образом, анализ ЧВС позволил разделить процессы, представленные на рис. 2а группами пиков 2 и 3 и выявить дефекты зубчатой пары 2-й ступени редуктора и подшипников 3-й ступени.

Выводы:

1. Применение EMD позволяет повысить эффективность очистки сигнала от тренда и шумов, что особенно актуально при обработке вибросигналов кранового оборудования.
2. Анализ ЧВС открывает более широкие возможности по выявлению и идентификации дефектов на основе вибросигнала.
3. Применение комплексного подхода к обработке и анализу вибросигналов, позволит эффективно диагностировать дефекты даже в сложных условиях.

Литература

1. А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес Диагностика технологических систем: учебное пособие. Часть 2. // М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Томский политехнический ун-т. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 128 с.
2. О. А. Александрова, А. Ю. Ганшкевич. Анализ результатов вибродиагностики при оценке технического состояния порталных кранов в ПАО «Северный порт» // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы [Электронный ресурс] : сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых / М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — Электрон. дан. и прогр. (13 Мб). — Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2019. — Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/>
3. Р. Ш. Мустафин, Е. В. Макарчева Опыт диагностики редукторов главного подъема грузоподъемных машин кислородно-конвертерного цеха на примере КГ-1830 // Журнал Евразийского союза учёных (ЕСУ) 2015, №6 (15) с. 132-136
4. А. Ю. Ганшкевич, О. А. Александрова Диагностирование дефектов механизмов порталных кранов на основе анализа спектров вибрации. // Сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции Интерстроймех–2018 [Электронный ресурс] (г. Москва, 8–12 октября 2018 г.) / ред. кол.: [С.Я. Галицков и др.]; М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — Электрон. дан. и прогр. — Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2018. — Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/>
5. Norden E. Huang, Zheng Shen, Steven R. Long, Manli C. Wu, Hsing H. Shih, Qunan Zheng, Nai-Chyuan Yen, Chi Chao Tung and Henry H. Liu The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal society A 2015, January, p. 903-995

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЗАЛЕЧИВАНИЕ
МИКРОТРЕЩИН ВНУТРИ ЦИНКОВЫХ ОБРАЗЦОВ**
*INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD
ON THE HEALING OF MICROCRACKS INSIDE ZINC SAMPLES.*

А.С. Сычев¹ – студент, Е.И. Байкова¹ – студент, А.В. Ченцов² – к.ф.-м.н., с.н.с.

К.В. Кукуджанов² – к.ф.-м.н., с.н.с.,

¹Московский авиационный институт

²ИПМех РАН

Sasa300498@yandex.ru

Abstract: The article presents the results of an experiment on short-term pulse high-energy electromagnetic treatment of zinc samples in order to study the healing of microcracks inside the material. The test procedures used are described and the analysis of the data obtained is presented.

Key words: pulse EM treatment, microdefects healing, uniaxial tension, zinc.

Аннотация. В статье представлены результаты эксперимента по обработке цинковых образцов короткоимпульсным высокоэнергетическим электромагнитным полем с целью изучения залечивания микроповреждений внутри материала. Описаны использованная установка и приведен анализ полученных данных.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, залечивание микродефектов, одноосное растяжение, цинк.

Гипотеза о том, что в проводящем материале может происходить залечивание дефектов под действием кратковременных импульсов высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП) была высказана достаточно давно [1]. Однако, несмотря на ряд работ [2–6], подтверждающих данную гипотезу, репрезентативные экспериментальные исследования этого явления не проводились. Настоящая работа является частью серии исследований, посвященных изучению процессов эволюции дефектов структуры цинка, таких как микротрещины и микропоры размерами до 1 мкм. Ее целью является экспериментальное подтверждение факта залечивания микродефектов в поликристаллическом цинке при воздействии на него ВЭМП определенной интенсивности и продолжительности. В эксперименте использовалось следующее оборудование: универсальная разрывная машина MTS Synergy 400, генератор ГОРН импульсного воздействия ВЭМП, исследовательский микроскоп Zeiss Axio Imager.D1m, сканирующий электронный микроскоп Quanta 650.

Использовались образцы из поликристаллического цинка марки ЦО (Zn 99,975%), вырезанные из листа металла, изготовленного путем горячей прокатки. Размеры цинковых образцов выбирались следующими: длина – 125 (± 5) мм; Длина рабочей части – 60 ($\pm 0,15$) мм; поперечное сечение – ширина – 6,7 ($\pm 0,15$) мм, толщина – 2,4 ($\pm 0,15$) мм; площадь сечения – 16 мм². На рис. 1,а показан вид образца до и после растяжения, а на рис. 1,б – образец, установленный в разрывной машине (виден также внешний экстензометр).

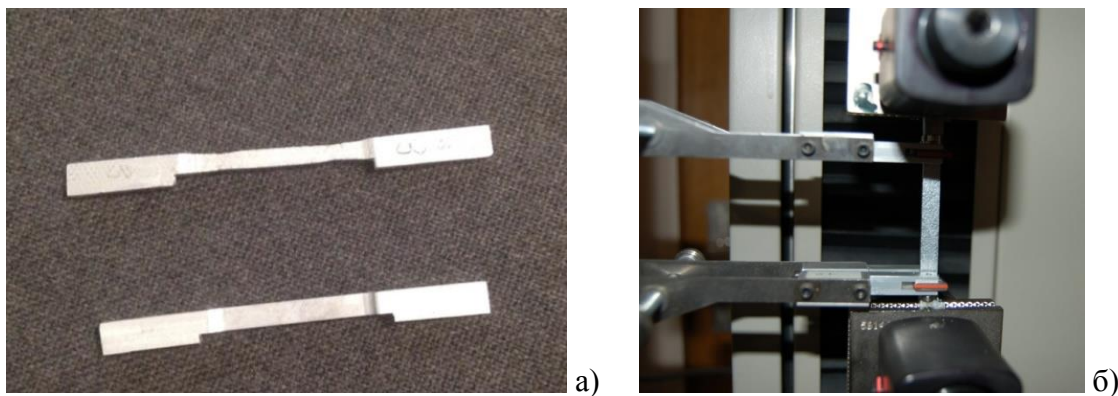


Рис.1. а) показан вид образца до и после растяжения; б) образец, установленный в разрывной машине

В достаточно чистом цинке рекристаллизация начинается уже при температурах близких к 50°C . На скорость рекристаллизации также влияют примеси, и интенсивность механической обработки при изготовлении. Поэтому образцы предварительно подвергались термообработке (отжигу) для снятия внутренних остаточных напряжений и получения сравнительно однородной (равноосной) зеренной структуры поликристаллического металла. Исследуемые образцы сначала равномерно нагревались до температуры 50°C в течение 3,5 мин, после чего резко охлаждались при температуре 3°C в течение 10 мин.

В работе рассматривалось влияние серии периодических прямоугольных импульсов ВЭМП на изменение микроструктуры цинковых образцов. Продолжительности единичных импульсов была примерно 20мкс, период повторения импульсов 1000мкс. Продолжительность приложенной серии импульсов - 3,0с. Приложенное ВЭМП индуцировало в металле ток с плотностью $j \approx 4,0 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$.

Проводилось сравнение микроструктуры 1) недеформированных образцов; 2) деформированных до разрушения образцов; и 3) деформированных до состояния, предшествующего разрушению образцов цинка, а после этого подвергшихся воздействию импульсного ВЭМП. Сравнительное исследование одних и тех же шлифов, проведенное с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов показало, что для целей настоящего исследования можно ограничиться оптическим микроскопом Zeiss Axio Imager.D1m с дополнительной линзой (который дает увеличение превышающее $\times 2000$). В эксперименте установлено, что в исходном недеформированном металле имеется незначительное количество микродефектов (микропор, микротрещин), размеры которых варьируются от 100нм до 100мкм. В процессе пластического деформирования (растяжения) образцов в них происходит рост исходных микродефектов и возникновение новых дефектов, что приводят при определенной деформации, которая называется предельной пластической деформацией, к макроразрушению металла в области образования шейки. В состоянии предшествующем макроразрушению в области шейки образца поврежденность (пористость) металла, рассчитанная для дефектов с линейными размерами 0,2-1,0 мкм, может локально достигать значений 0,20. Кроме того, необходимо заметить, что в цинке при пластическом деформировании происходит интенсивное образование двойников. Распределение микродефектов вблизи крупных внутренних повреждений показано на рис. 2,а для образца после разрыва без воздействия ВЭМП (вблизи поверхности разрушения) и на рис. 2,б после обработки образца приложенным ВЭМП (в области шейки, после растяжения до напряжения $\sigma^* = 0,97\sigma_{\text{max}}$).

После обработки приложенным импульсным ВЭМП в цинке наблюдается уменьшение поврежденности вследствие залечивания микродефектов (микропор, микротрещин) размерами 0,2-1,0 мкм.

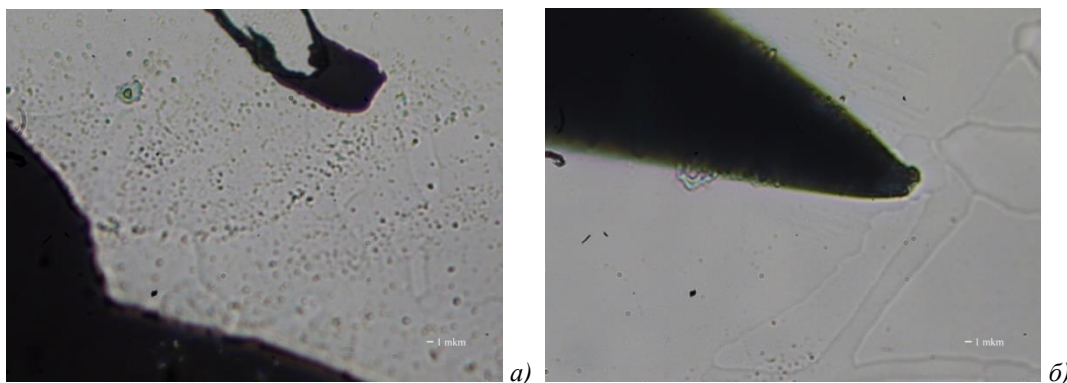


Рис. 2. Микродефекты в области шейки (а) – для образца после разрыва без воздействия ВЭМП (вблизи поверхности разрушения); б) после обработки образца приложенным ВЭМП (в области шейки, после растяжения до напряжения $\sigma^*=0,97\sigma_{\text{тах}}$). Шкала 1 мкм

На рис. 3 представлена обзорная микрофотография поликристаллической структуры деформированного образца. Структуры типа двойников занимают значительную долю сечения зёрен, а сами зёрна всё ещё достаточно крупные. В недеформированных образцах мелкие зёрна и двойники не наблюдаются.



Рис. 3. Зеренная структура деформированных образцов (без ВЭМП).
По вертикали - толщина образца (2,3мм)

Вывод

В ходе работы выяснено влияние рассматриваемого воздействия ВЭМП на микропоры и микротрещины в поликристаллическом цинке, образовавшиеся в процессе интенсивной пластической деформации при растяжении. После приложения рассматриваемого ВЭМП внутри цинковых образцов наблюдается уменьшение поврежденности (пористости) вследствие залечивания микродефектов (микропор, микротрещин) размерами 0,2-1,0 мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00958

Литература

1. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. Влияние локально-неоднородного импульсного электрического поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 4. С. 184-187.
2. Song Hui, Wang Zhong-jin, Gao Tie-jun. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // Trans. Nonferrous Soc. China, 2007, V. 17, pp. 87-92.
3. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E., and Murav'ev V.V. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts. Tech. Phys., 1997, Vol. 49, No. 2, pp. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774.
4. Громов В.Е., Чиракадзе Д.З., Семакин Е.В. и др. Электростимулированное восстановление ресурса выносливости сварных соединений // Известия РАН. Серия физическая. 1997. - №5. - С. 1019-1023.
5. Троицкий О. А., Баранов Ю. В., Авраамов Ю. С., Шляпин А. Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов: (теория, технология, структура и

свойства). — М.-Ижевск: Ин-т Компьютерных Исследований, 2004. – 590 с.

6. Conrad H. A study into the mechanism(s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue. Final Report ARO Proposal Number 23090-MS, ARO Funding Document DAAL03-86-K-0015, U. S. Army Research Office, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695. March 10, 1989, 52 p.

ВЫБОР РОВИНГОВОЙ ТКАНИ С ПРОПИТКОЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ *TO THE CHOISE OF IMPRIGNATED ROVING FABRIC FOR HOT BULK FORGING PROCESSES*

Тимофеев В.В. – магистрант,

Петров М.А. – к.т.н., Dr.-Ing., доцент

115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 16, ФГБОУ ВО «Московский Политехнический
Университет», Факультет машиностроения, кафедра «Обработка материалов давлением и
аддитивные технологии»

e-mail: timofeevthe@gmail.com

Abstract. This study determines the properties of impregnated roving fabric, which is a combination of non-diffusion-related materials. Such kind of material should provide a certain tribological conditions, which are sufficient and necessary for hot bulk forging processes of heat-resistant steels and titanium alloys.

Key words: tribological conditions, heat-insulating coating, impregnated roving fabric, glass fiber, hot bulk forging.

Аннотация. В данном исследовании определяются свойства ровинговой ткани с пропиткой, представляющей собой совокупность не диффузионно-связанных материалов. Такой материал должен обеспечивать определённые трибологические условия, которые являются достаточными и необходимыми для условий горячей объёмной штамповки жаропрочных сталей и титановых сплавов.

Ключевые слова: трибологические условия, теплоизоляционное покрытие, ровинговая ткань с пропиткой, стеклоткань, горячая объёмная штамповка.

Исследования свойств тканей с пропиткой. В процессе штамповки в зависимости от толщины слоя смазочного вещества (СВ) возможны три основных вида трения (сухое трение, граничное трение и жидкостное трение), а также смешанные виды трения (полусухое и полужидкостное) [1, 2]. На практике невозможно поддерживать режим жидкостного трения в течение всего процесса штамповки без применения специальных схем. В процессе обычного деформирования смазка постепенно выдавливается и жидкостное трение переходит в режим граничного трения. Эффект Ребиндера оказался весьма важным для совершенствования процессов обработки материалов давлением (ОМД), в частности, штамповки, которая практически всегда осуществляется со СВ. Процессы ОМД, особенно труднодеформируемых металлов и сплавов, существенно облегчаются при добавлении в СВ поверхностно-активных веществ (ПАВ) или веществ, аналогично ведущих себя при высоких температурах (например, расплавы стекла и солей), которые по рассмотренному выше механизму размягчают и пластифицируют поверхностные слои деформируемого металла. При этом обрабатываемый металл как бы смазывает сам себя, локализуя в поверхностном пластифицированном слое избыточную сдвиговую деформацию, обусловленную действием сил трения. Таким образом, действие жидких и твердых СВ сводится к тому, чтобы существенно снизить неравномерность деформации, чтобы сила штамповки почти полностью расходовалась на полезную работу пластической деформации, а потери на трение, т.е. потери на создание дополнительной сдвиговой деформации поверхностного слоя металла, при этом были минимальны. Цель исследования состояла в выборе ровинговой ткани (РТ) и определение её свойств после пропитки, которая может быть использована для штамповки труднодеформируемых жаропрочных сплавов. Результаты выбора материала пропитки и связующего представлены в таблице 1. Данные таблицы для пропиток графитовой эмульсии и вода-графит были взяты из открытых источников [3, 4]. Данные по пропитке вода-нитрид бора были получены самостоятельно в лаборатории. Данные по свойствам выбранных стеклотканей, подходящих для высокотемпературной штамповки, представлены в таблице 2. Некоторые значения параметров были взяты из открытой литературы [5 – 9]. Такие

параметры, как осажденный графит на стеклоткани, температура размягчения и другие определялись самостоятельно. Наилучшая адгезионная способность пропитки к РТ, т.е. отсутствие свободного осыпания при изгибе РТ, была достигнута на пропитке №1. На рисунке 1 представлены снимки поверхности стеклотканей с пропиткой №1 на разных увеличениях.

Таблица 1. Сравнительные характеристики смазочных материалов пропитки

Физические свойства материала	Эмульсия графитовая (№1)	Вода-графит (№2)	Вода-Нитрид бора (№3)
Плотность, при 20°C, г/см ³	~ 1,280	~ 1,140	~ 0,980
Вязкость, чаша Форда №4, с	~ 48	~ 35	~ 12
Температура вспышки, °C	> 250	н/д	н/д
pH	8	8 – 11	7
Сухой остаток, %	40	29 – 32	27
Размер антиадгезионных частиц, мкм	< 4		

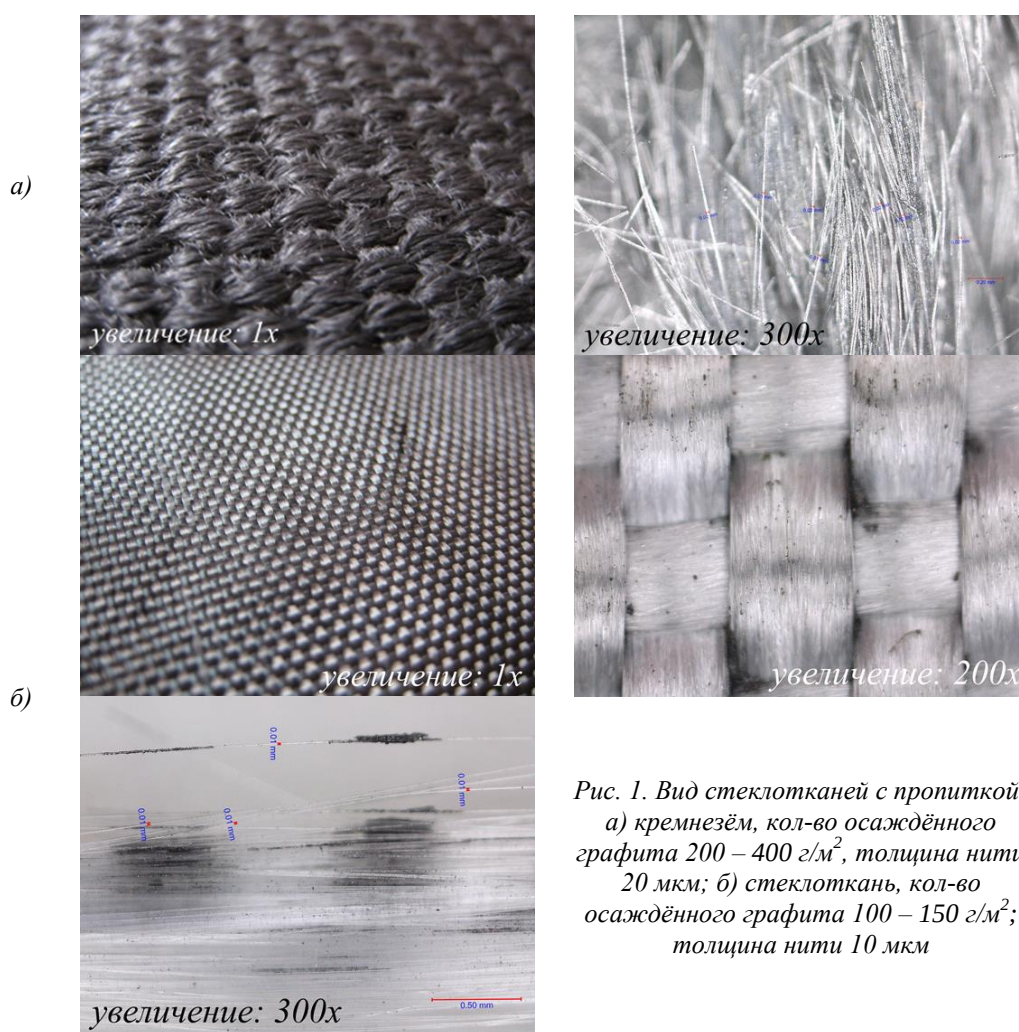


Рис. 1. Вид стеклотканей с пропиткой:
а) кремнезём, кол-во осаждённого графита 200 – 400 г/м², толщина нити 20 мкм; б) стеклоткань, кол-во осаждённого графита 100 – 150 г/м²; толщина нити 10 мкм

На рисунке 2 приведён вид стеклоткани после высокотемпературного нагрева. Видно, что отдельные нити и волокна ткани консолидировались, спеклись друг с другом. Температура размягчения не была достигнута вплоть до 1 200°C. При более высоких температурах испытания не проводились, так как температура штамповки рассматриваемых сплавов лежит ниже температуры проведения эксперимента.

Таблица 2. Характеристики выбранных стеклотканей с пропиткой

Физико-механические свойства	Стеклоткань Т13 (ГОСТ 19170-73)	Кремнезём (ГОСТ Р 56212-2014)
Тип стекла	Е (без бора) (ШСБ)	Кремнезём (К11ТР)
Тип плетения	ровинг	
Химический состав, масс %	$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$	SiO_2 менее 95 %
Толщина ткани, мм	$0,27 \pm 0,03$	2,0 – 2,5
Тип плетения: а – полотняное (1/1); б – рогожка.		
Плотность, г/см ³	2,62	2,15
Поверхностная плотность без пропитки, г/м ²	285 ± 9	1 400
Осажденный графит на стеклоткани, г/м ²	100 – 150	300 – 400
Поверхностная плотность с пропиткой, г/м ²	333 ± 15	1 700
Коэффициент линейного расширения, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	6	0,54
Модуль растяжения (упругости), ГПа	80 – 81	69 – 74
Предел прочности при растяжении, МПа	3 100 – 3 500	3 400
Предельная деформация (удлинение до разрыва) ϵ , %	4,6	5
Температура размягчения	916	> 1 200
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	1 200	1 670
Пропитка	эмульсия графитовая	



Рис. 2. Кремнезёмная ткань: а) в процессе нагрева до верхнего значения температуры штамповки; б) после нагрева

Исследование поведения ткани с пропиткой при штамповке. Эксперименты по горячей объёмной штамповке с применением первоначально разработанной РТ с графитовой пропиткой был проведён с применением РТ по ГОСТ 17139-2000 (данные в таблице 2 отсутствуют). Заготовки массой 380 кг из жаропрочных сплавов ЭП698 и ЭП742, нагретые до температуры 1 150 $^\circ\text{C}$, деформировались на гидравлическом прессе. Температура подогрева инструмента составляла 400 $^\circ\text{C}$. Ровинговую ткань укладывали в два слоя под углом 90 $^\circ$ на поковку и в один слой на нижний инструмент (матрицу). В результате такого термомеханического нагружения ровинговая ткань разрушалась в процессе деформирования основного материала поковки. Это указывало на необходимость выбора более прочного и температуростойкого типа ткани.

Выводы и перспективы. Дальнейшие работы предполагается проводить на более прочных стекловолоконных тканях кремнезёмного типа, характеристики которых показаны в таблице 2. Применение в качестве основы высокотемпературного стеклянного

волокна вместе с дополнительной пропиткой №1 (эмульсия графита) даёт возможность использовать материал не только в качестве огнеупорного/теплоизолирующего (с температурой эксплуатации до 1 300°C – 1 400°C) покровного материала, но и позволяет утверждать о потенциальном снижении трения на контактной поверхности с инструментом. Соответственно, это снизит износ и увеличит стойкость штамповой оснастки [10]. Также применение РТ с пропиткой позволит получить более качественную поверхность, обеспечить лучшую теплозащиту заготовки, уменьшить вероятность залипания заготовки в штампе и засорение гравюры штампа излишками графита, что также положительно влияет на повышение стойкости штампового инструмента. Предполагается проведение численного моделирования процесса горячей объёмной штамповки с усреднённым значением фактора трения, выбранного для описания РТ с графитовой пропиткой.

Литература

1. Абрамов А.Н. Оценка трибологических свойств технологических смазочных материалов / А.Н. Абрамов, В.Ю. Шолом, Л.Ш. Шустер // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. - №10. - С.8-12.
2. Калпин Ю.Г. Определение коэффициента трения при горячей изотермической осадке / Ю.Г. Калпин, Г.В. Елисеев // Известия вузов. Машиностроение. 1976. №5. С.157-160.
3. Атрошенко А.П. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов /А.П. Атрошенко, В.И. Федоров. Л.: Машиностроение, 1979. - 287с.
4. Барыкин Н.П. Высокотемпературные смазочные материалы для горячей обработки металлов давлением / Н.П. Барыкин, А.Х. Валеева, И.Ш. Валеев // Кузнечно-штамповочное производство и Обработка металлов давлением,-2004.-№10.-С. 34-35.
5. Дудеров И.Г., Матвеев Г.М., Суханов В.Б. Общая технология силикатов.- М.: Стройиздат, 1987. – 560с.
6. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия для горячей обработки давлением сталей и сплавов /С.С. Солнцев, В.А. Розененкова, Н.А. Миронова //Стекло и керамика. 2007. №6. - С.24-27.
7. Technical Data Sheet and Material Safety Data Sheet, Condalu 51, www.condat.com.
8. ТУ 0258-045-73103972-2018
9. ГОСТы: 56212-2014, 17139-2000, 19170-73.
10. Петров А.Н. Повышение стойкости штампов при горячей штамповке путем изыскания оптимальных технологических смазок на водной основе: дис. . канд. техн. наук: 05.03.05 / Московский государственный технический университет «МАМИ» М., 1988. – 142 л.

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ С
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ¹**
*THE CORRELATION OF GEOMAGNETIC STORMS WITH THE OPERATION
OF ELECTROMECHANICAL OBJECTS*

Тумакова Е.В. – старший преподаватель

МГТУ им. Н.Э. Баумана

tumakova_ekaterina91@mail.ru

Abstract. A description of the influence of space weather parameters on electromechanical objects is given in the work. Geo-induced currents are considered as the main source of danger for electromechanical objects. A comparison of the experimental data obtained at the Surgut state district power station-2 with the data of the IZMIRAN archive is carried out.

Key words: electromechanical objects, space weather, geomagnetic storms.

Аннотация. В работе приводится описание влияния параметров космической погоды на электромеханические объекты. Рассматриваются геоиндуцированные токи, как основной источник опасности для электромеханических объектов. Проводится сравнение экспериментальных данных, полученных на Сургутской ГРЭС-2, с данными архива ИЗМИРАН.

Ключевые слова: электромеханические объекты, космическая погода, геомагнитные бури.

Влияние космической погоды на функционирование электромеханических объектов на сегодняшний день является малоизученным и, как следствие, актуальным вопросом. Под термином «космическая погода» понимается комплекс процессов, происходящих на Солнце и в гелиосфере, создающий прямые или опосредованные риски для нормального функционирования природных, технологических и биологических систем, находящихся на Земле, в околоземном пространстве и в любой точке солнечной системы [1].

Космическая погода оказывает негативное воздействие на человека и космическую деятельность, порождая многочисленные риски и потери. Сильные авроральные токи в периоды геомагнитных бурь могут разрушить и повредить современные линии электропередач, вызвать повышенную коррозию нефте- и газопроводов [2].

Магнитосфера Земли является динамической системой, реагирующей на изменения параметров солнечного ветра. В периоды магнитосферных возмущений различные части магнитосферной токовой системы, в том числе кольцевой ток, ионосферные токи, токи в хвосте магнитосферы и на магнитопаузе испытывают значительные изменения. На поверхности Земли изменения магнитосферных токов проявляются в вариациях локального геомагнитного поля. Помимо этого, изменение во времени магнитосферных токов и токов в ионосфере возбуждает на поверхности Земли геоэлектрическое поле, которое может стать причиной развития токов в токопроводящих технологических сетях. Такие токи принято называть теллурическими или геоиндуцированными токами [3]. По данным, полученным из [4], самое большое когда-либо измеренное значение геоиндуцированного тока составляет 320 А в нейтрали трансформатора (107 А на фазу) в Швеции во время геомагнитной бури в апреле 2000 года. Диапазон частот геоиндуцированных токов составляет от 0,0001 до 1 Гц. За последние 30 лет произошло несколько крупных аварий на электромеханических объектах, вызванные геомагнитными бурями. Самой крупной магнитной бурей является буря, прошедшая в октябре-ноябре

¹ Работа поддержана в рамках НИР 9.4968.2017/БЧ по выполнению инициативных научных проектов базовой части государственного задания

2003 года. В результате этой бури только в Швеции и Дании без электроснабжения осталось около 5 млн. человек.

На подстанциях линий электропередач, геоиндуцированные токи текут через трансформаторные обмотки и по заземлению. В энергетических системах эти токи приводят к насыщению трансформаторов, их перегреву и разрушению [5].

В данной работе приводится сопоставление экспериментальных данных, записанных на Сургутской станции ГРЭС-2 летом 2010 года, с данными о вариациях магнитного поля Земли, и индексами геомагнитной активности из архива геофизических данных ИЗМИРАН (Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук»).

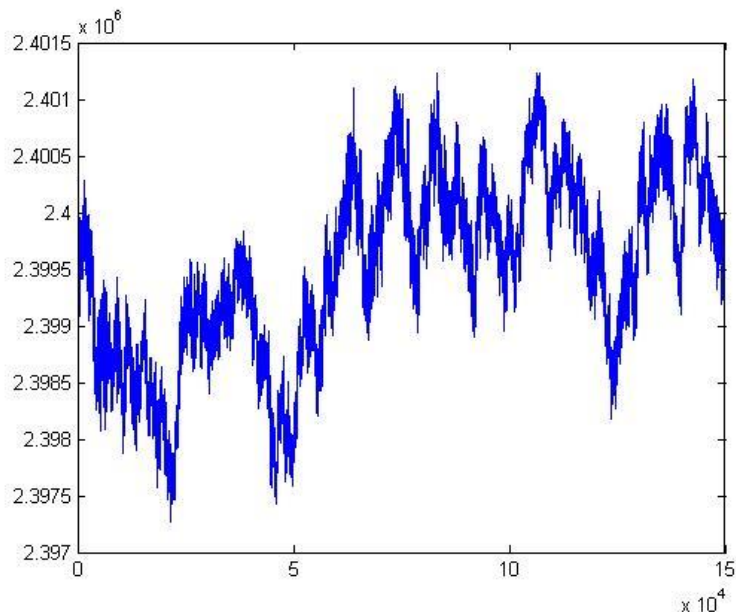


Рис. 1. Хронограмма, 16.06.2010

Сургутская ГРЭС-2 – крупнейшая тепловая электростанция (ГРЭС) России, расположенная в городе Сургут Ханты-Мансийского автономного округа вблизи водохранилища ГРЭС на реке Чёрная [6]. С помощью фазохронометрической системы, подробно описанной в [7-9], были получены хронограммы вращения турбины ГРЭС. Пример хронограммы приведён на рисунке 1. Данная хронограмма была записана 16 июня 2010 года в 18 ч 50 мин по Московскому времени. Эта хронограмма выделяется среди других хронограмм наличием резких скачков.

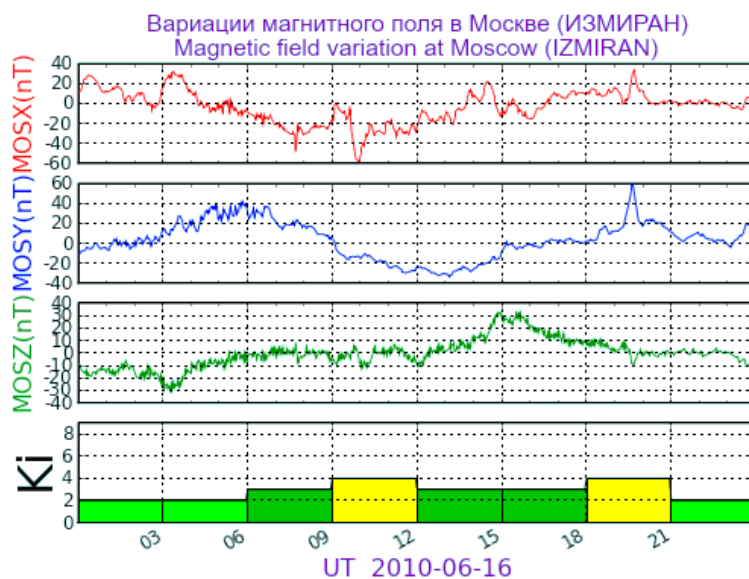


Рис. 2. Данные ИЗМИРАН, 16.06.2010

С 1998 года в ИЗМИРАН работает Центр прогнозов космической погоды – гелиогеофизическая служба, в которой результаты фундаментальных исследований по проблемам солнечно-земной физики практически используются для ежедневного прогнозирования различных параметров космической погоды на различные сроки предупреждения и для оперативного обеспечения этими прогнозами потребителей [1].

С помощью архива геофизических данных ИЗМИРАН, приведённого на сайте <http://forecast.izmiran.ru> [10], были получены данные о вариациях магнитного поля Земли, а также индексы геомагнитной активности в указанную дату (16.06.2010) (рисунок 2). Как следует из архивных данных [10] 16 июня наблюдалась слабая геомагнитная буря (индекс $K_p=4$).

Таким образом, в результате сопоставления данных удалось выявить совпадение нестабильности в работе турбоагрегата ГРЭС-2 с датой прохождения магнитной бури. Данные результаты являются начальным этапом в работе по разработке единой информационно-измерительной системы мониторинга состояния электромеханических объектов с учётом влияния магнитных бурь с целью предотвращения крупных аварий.

Работа поддержана в рамках НИР 9.4968.2017/БЧ по выполнению инициативных научных проектов базовой части государственного задания

Литература

1. Гайдаш С.П., Белов А.В., Абуни А.А., Абунина М.А. Центр прогнозов космической погоды (ИЗМИРАН) // В сборнике: Практические аспекты гелиогеофизики Материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». Сер. "Прикладные аспекты космической погоды" Под редакцией А.А. Петруковича, А.М. Мёрзлого, С.Ю. Хабибулина. 2016. С. 22-32.
2. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 3-13.
3. Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Статистические взаимодействия вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геиндуцированных токов // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 1. С. 48-58.
4. Pulkkinen, A., Pirjola, R., Viljanen, A.: Statistics of extreme geomagnetically induced current events, Space Weather, 6, S07001, 2008.
5. Синицын Д.В., Клибанова Ю.Ю. Физическое обоснование возникновения геомагнитных индуцированных токов и их воздействие на электрические сети // В сборнике: Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 2019. С. 123-128.
6. ЮНИПРО. URL: <http://www.unipro.energy/about/structure/affiliate/surgutskaya> (дата обращения: 09.09.2019).
7. Киселев М. И. [и др.]. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. №11. С. 10 – 13.
8. Бережко И. А., Гостюхин О. С., Комшин А. С. Информационные измерительные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики // Приборы, 2014. № 5. С. 13 – 17.
9. Ермаков К. С., Тумакова Е. В. Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 10. С. 171 – 180.
10. Геофизические данные ИЗМИРАН. URL: <http://forecast.izmiran.ru> (дата обращения: 09.09.2019).

РАСЧЁТ ОСВЕЩЁННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ИСТОЧНИКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

THE CALCULATION OF THE LIGHT SOURCE OF THE SURFACE COMPLEX FORMS

Федорова Е.Д. – студентка

ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ)

elenka.fedorova.9912@list.ru

Abstract. The aim of the work is to calculate the power of the radiant energy flux from different light sources. The relevance of the study is explained by the gradual transition to fundamentally new light sources, in which not only the spectrum, but also the distribution of energy along the radiator is changed. In technology, point light sources are replaced by distributed emitters. In distributed sources, energy is emitted either by an extended line or by a luminous surface. The practical orientation of the work is proved by the introduction of distributed illumination of surfaces into the technique both in everyday life and in instrument making. To assess the energy efficiency of different light sources it was necessary to conduct a comparative analysis of typical devices.

Key words: light, illuminance, photometry, light source, lamp.

Аннотация. Цель работы заключается в расчёте мощности потока лучистой энергии от различных источников света. Актуальность исследования объясняется постепенным переходом к принципиально новым источникам света, в которых изменён не только спектр, но и распределение энергии по излучателю. В технике происходит замена точечных источников света распределёнными излучателями. В распределённых источниках энергия излучается либо протяжённой линией, либо светящейся поверхностью. Практическая направленность работы доказана внедрением в технику распределённых подсветок поверхностей как в быту, так и в приборостроении. Для оценки энергоэффективности различных источников света необходимо было провести сравнительный анализ типовых устройств.

Ключевые слова: свет, освещённость, фотометрия, источник света, лампа.

Современные здания и сооружения характеризуются сложным и оригинальным дизайном не только внешней архитектуры, но и в интерьере, в том числе в системе освещения помещений. Источники света часто имеют сложную форму. Всё чаще применяются не точечные, а распределённые источники света, которые могут быть нескольких видов [1].

1) Линейные распределённые источники света типа традиционных люминесцентных трубчатых ртутных ламп, например, типа ЛБ40.

2) Поверхностные распределённые источники света, например, со светящимися светодиодными панелями или с поверхностными рассеивателями световой энергии.

3) Объёмные источники света, которые применяются пока в основном для декоративного дизайна или рекламы.

Какой бы вид не имел источник света, неизменными остаются требования Санитарных норм и правил (СНиП) к освещённости помещений в зависимости от их назначения. Например, самые жёсткие требования с освещённостью до 500 Лк предъявляются к школьным учебным кабинетам. Не менее жёсткие требования с освещённостью до 600 Лк применяются к швейным цехам. Особые требования разработаны для медицинских помещений, особенно операционных комнат. В любом случае целесообразно уметь теоретически определять освещённость помещения любыми источниками света, в том числе распределёнными даже самой сложной формы.

Самый простой вариант освещения – это один центральный точечный источник света.

Получена следующая формула для интегральной мощности освещения поверхности квадрата со стороной a точечным источником света, расположенным на высоте h над центром квадрата: $N_1 = 4I \arctg \frac{a^2}{2h\sqrt{h^2 + \frac{a^2}{2}}}$.

Для решения задачи о сложной форме источника света надо изучить точечный нецентральный источник. Расчёт интегральной мощности освещения квадрата произвольным точечным нецентральный источником выполнен по следующей методике. Точечный источник света с силой света I , например, $I = 1$ кд, расположен на высоте h над квадратом со стороной a в произвольной точке. Требуется определить мощность излучения от этого источника, которое проходит через поверхность квадрата. Расчётная схема показана на рис.1.

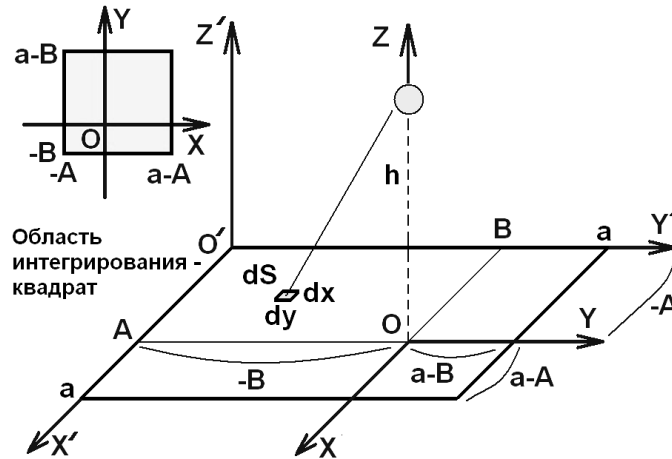


Рис.1. Схема освещённости квадрата точечным нецентральный источником

Положение нецентрального источника света задаётся двумя отступами A и B от сторон квадрата. Если $A = B = \frac{a}{2}$, то источник света становится центральным, поэтому для него должна быть справедлива формула интегральной мощности, полученная в соответствующем параграфе работы. Отступы A и B от сторон квадрата имеют размерность длины (метры) и находятся в пределах $A, B \in [0; \frac{a}{2}]$. Косинус угла падения лучей света от точечного источника на элементарную площадку определяется формулой $\cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}$. Величина освещённости вычисляется по закону фотометрии $E = \frac{I \cos \alpha}{r^2} = \frac{I \cos \alpha}{x^2 + y^2 + h^2} = \frac{I \cos \alpha}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$. Освещённость представляет собой распределение

мощности световой энергии по исследуемой поверхности $E = \frac{dN}{dS} = \frac{I \cos \alpha}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$. Из этой формулы определяется мощность освещения элементарной площадки $dN = \frac{I \cos \alpha}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dS$. Для определения интегральной мощности освещения надо суммировать мощности освещения всех элементарных площадок поверхности, то есть выполнить интегрирование. $N = \iint_{(S)} dN = \int_{(S)} \frac{I h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dS$

Интегрирование выполняется в декартовых координатах, начало которых расположено в центре квадрата, имеющего сторону a .

$$N = \int_{(S)} \frac{I h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy = \int_{x=-A}^{x=a-A} dx \int_{y=-B}^{y=a-B} \frac{I h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dy =$$

$$= Ih \int_{x=-A}^{x=a-A} dx \int_{y=-B}^{y=a-B} \frac{1}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dy.$$

Для выполнения дальнейших преобразований удобно воспользоваться справочником [2, с.92, интеграл 17], в котором приводится следующая формула для искомой первообразной $\int \frac{dx}{(x^2 \pm a^2)^{\frac{3}{2}}} = \pm \frac{x}{a^2 \sqrt{x^2 \pm a^2}} + C$. Применяя эту формулу [2, с.92, интеграл 17], к искомому интегралу, получаем следующие выражения:

$$N = Ih \int_{x=-A}^{x=a-A} \frac{y}{(x^2 + h^2) \sqrt{y^2 + x^2 + h^2}} \Big|_{y=-B}^{y=a-B} dx =$$

$$= Ih \int_{x=-A}^{x=a-A} \left[\frac{a-B}{(x^2 + h^2) \sqrt{(a-B)^2 + x^2 + h^2}} + \frac{B}{(x^2 + h^2) \sqrt{B^2 + x^2 + h^2}} \right] dx.$$

Для выполнения дальнейших преобразований удобно воспользоваться справочником [2, с.94, интеграл 11], в котором приводится следующая формула для искомой первообразной

$$\int \frac{dx}{(x^2 + b^2) \sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{1}{b \sqrt{a^2 - b^2}} \arctg \frac{x \sqrt{a^2 - b^2}}{b \sqrt{x^2 + a^2}} + C, \quad a^2 > b^2.$$

Применяя эту формулу [2, с.94, интеграл 11], к искомому интегралу, получаем следующие выражения: $N = I \left[\arctg \frac{(a-B)(a-B)}{h \sqrt{h^2 + (a-A)^2 + (a-B)^2}} + \arctg \frac{A(a-B)}{h \sqrt{h^2 + A^2 + (a-B)^2}} + \right.$

$$\left. + \arctg \frac{(a-A)B}{h \sqrt{(a-A)^2 + h^2 + B^2}} + \arctg \frac{AB}{h \sqrt{A^2 + h^2 + B^2}} \right].$$

Получена следующая формула для интегральной мощности освещения поверхности квадрата со стороной a точечным источником света, расположенным в произвольной точке на высоте h над квадратом с отступами A и B от его сторон:

$$N_{\text{пр}} = I \left[\arctg \frac{(a-B)(a-B)}{h \sqrt{h^2 + (a-A)^2 + (a-B)^2}} + \arctg \frac{A(a-B)}{h \sqrt{h^2 + A^2 + (a-B)^2}} + \right.$$

$$\left. + \arctg \frac{(a-A)B}{h \sqrt{(a-A)^2 + h^2 + B^2}} + \arctg \frac{AB}{h \sqrt{A^2 + h^2 + B^2}} \right].$$

Размерность величин в правой и в левой частях этой формулы соответствует мощности (Вт). Асимптотический анализ позволяет выявить закономерности мощности интегральной освещённости квадрата при бесконечном удалении от него источника света или при расположении источника на поверхности квадрата в произвольной точке или над квадратом в произвольной точке. При бесконечном удалении источника света от квадрата получаем нулевое значение интегральной мощности освещения, что соответствует положению фотометрии для убывания величины освещённости по закону обратных квадратов от расстояния: $\lim_{h \rightarrow +\infty} N_{\text{пр}} = I(0 + 0 + 0 + 0) = 0$. При размещении точечного источника света в центре квадрата, то есть при нулевой высоте ($h = 0$), получаем формулу для мощности излучения в каком-то приведённом телесном угле: $\lim_{h \rightarrow 0} N_{\text{пр}} = I \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) = 2\pi I$. Полученное значение последнего предела хорошо согласуется с физическим смыслом задачи об освещении квадрата положенным на него в центре точечным источником света и с законом сохранения энергии. В этом случае вся энергия от источника света распределяется по двум одинаковым телесным углам: 2π (стерадиан) под источником света, где расположена плоскость освещаемого квадрата, и 2π (стерадиан) над источником света, где находится свободное пространство, в которое энергия излучения уходит в бесконечность. Этот проверочный асимптотический результат полностью совпадает со случаем асимптотик для точечного центрального источника

света, исследованного первым в самом начале работы. Полученная формула позволяет перейти к расчёту освещённости помещения квадратной формы источником света любой формы [3-5]. Для этого сначала надо определить элементарную плотность потока энергии распределённого источника света с площадью S по формуле

$$\frac{dN_{\text{пр}}(x; y)}{S} = I \left[\arctg \frac{(a-y)(a-y)}{h\sqrt{h^2 + (a-x)^2 + (a-x)^2}} + \arctg \frac{x(a-y)}{h\sqrt{h^2 + x^2 + (a-y)^2}} + \right. \\ \left. + \arctg \frac{(a-x)y}{h\sqrt{(a-x)^2 + h^2 + y^2}} + \arctg \frac{xy}{h\sqrt{x^2 + h^2 + y^2}} \right].$$

Потом предполагаем, что источник света состоит из множества элементарных точечных источников с указанной плотностью энергии, поэтому выполняем интегрирование по равномерно светящейся плоской поверхности D сложной формы.

$$N = I \left[\iint_D \left(\arctg \frac{(a-y)(a-y)}{h\sqrt{h^2 + (a-x)^2 + (a-x)^2}} + \arctg \frac{x(a-y)}{h\sqrt{h^2 + x^2 + (a-y)^2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \arctg \frac{(a-x)y}{h\sqrt{(a-x)^2 + h^2 + y^2}} + \arctg \frac{xy}{h\sqrt{x^2 + h^2 + y^2}} \right) dx dy \right].$$

Под двойным интегралом находится сложная функция. Аналитически продолжать вычисления не получится из-за неберущихся интегралов. Необходимо применить численные компьютерные методы расчётов. Эти методы аналогичны определению массы неоднородной плоской пластины с заданной поверхностной плотностью, которая записана как функция двух переменных под двойным интегралом. Численные расчёты нескольких вариантов распределённых источников света сложных форм доказали правильность разработанной методики.

Литература

1. Элементарный учебник физики. Учеб. пособие. В 3-х т. / Под ред. Г.С.Ландсберга: Т.3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – 13-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
2. Интегралы и ряды. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1981. – 800 с.
3. Федорова Е.Д. Расчёт освещённости поверхности элемента приёмника излучения точечными и распределёнными источниками света / Материалы Международного молодёжного научного форума "Ломоносов 2019" 8-12 апреля 2019 г. - М.: МГУ им. М.В.Ломоносова. - ISBN 978-317-06100-5.
4. Федорова Е.Д., Лебедев В.В. Новый бестеневого распределённый источник света / Четвёртый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии". - Москва, 27-30 ноября 2018 г. - Сборник материалов. - Том 1. - М.: ООО "Буки Веди", 2018. - 914 с. - ISBN 978-5-4465-20-56-5. - С.863-869. - Электронный ресурс: <https://n-materials.ru/>
5. Федорова Е.Д. Новый бестеневого источник света и его применение в строительстве, медицине и электронике / Сборник тезисов III Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Материалы и технологии XXI века" 29-31 октября 2018. - Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018. - 326 с. - Секция 1: "Медицина 21 века". - С.88. - Электронный ресурс: <http://www.mt21kpfu.com/>

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О
РАЗРУШЕНИИ ТЕЛ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ¹**
*STUDYING THE INFLUENCE OF NUMERICAL SIMULATION PARAMETERS
ON THE SOLUTIONS OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS ON THE
DESTRUCTION OF BODIES WITH CRACK-LIKE DEFECTS*

Феклистова Е.В.¹ – аспирант, младший научный сотрудник, **Вильдеман В.Э**¹ – д-р физ.-мат. наук, директор, **Третьяков М.П**¹ – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет

cem.feklistova@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the study of damage accumulation processes in solving problems of the destruction of bodies with crack-like defects. We consider such parameters of numerical modeling as the magnitude of the step of loading, finite element mesh, the spread of the strength properties of finite elements.

Key words: fracture criterion, numerical modeling, crack propagation, mathematical model.

Аннотация. Работа посвящена изучению процессов накопления повреждений при решении задач о разрушении тел с трещиноподобными дефектами. Рассматриваются такие параметры численного моделирования как величина шага нагружения, конечно-элементная сетка, разброс прочностных свойств конечных элементов.

Ключевые слова: критерий разрушения, численное моделирование, развитие трещины, математическая модель.

Для уточненного моделирования процессов развития дефектов и протекания процессов разрушения требуется более полное понимание процессов, сопровождающих закритическое деформирование материалов, что связано с получением соответствующих экспериментальных и теоретических данных о поведении конструкций при различных видах напряженно-деформированного состояния. При этом, математические модели, описывающие поведение материалов должны точно отражать основные эффекты поведения при нагружении, описывать основные стадии развития повреждений в материалах и учитывать влияние этих повреждений на процессы деформирования и разрушения [1, 2].

Изначально присутствующие в материале дефекты структуры, такие как пустоты, раковины, вкрапления других материалов могут становиться очагами возникновения трещин и приводить к разрушению. При моделировании используются различные подходы для имитации прорастания трещины, так в [3, 4] используется подход, согласно которому каждый конечный элемент является элементом материала с некоторым числом зерен. Развитие трещины имитируется последовательным разрушением элементов согласно закону накопления повреждений и выбранному критерию разрушения. В разрушенных элементах уменьшается жесткость на несколько порядков по сравнению с жесткостью окружающего материала. При этом, размер элемента является шагом приращения длины трещины в области разрушения конструкции. Однако, такой подход может применяться только для моделирования трещин с заранее заданным направлением подрастания. Так как разрушение представляет собой процесс многоуровневый и многостадийный [5, 6], включающий стадию зарождения и развития микродефектов с последующим их слиянием в одну или несколько магистральных трещин, то более перспективными для использования могут оказаться подходы, основанные на применении для анализа процессов разрушения соотношений механики поврежденной среды, позволяющие

¹ Работа поддержана РФФИ, проект № 16-19-00069

прогнозировать весь процесс развития дефектов в материале от момента их зарождения до предельного раскрытия магистральной трещины.

Однако, при использовании численных расчетов для моделирования физических процессов необходимо учитывать большое количество факторов, непосредственно влияющих на результаты расчета. К таким параметрам относят тип конечно-элементной сетки, число элементов в расчетной области, их качество, разброс упругих и прочностных характеристик и т.д. Так, в [7] изучалась зависимость некоторых результатов расчета от параметров разбиения неструктурированной сетки. При этом, при решении задач о разрушении, некоторыми исследователями отмечалось, что трещина может отклоняться в ту или иную сторону, вне зависимости от своего «истинного» направления, соответствующего физике процесса разрушения. Для минимизации данного явления авторами [8, 9, 10] моделируется двухуровневая конечно-элементная сетка, которая при подрастании автоматически перестраивается, другие же исследователи, чтобы уменьшить чувствительность конечно-элементной сетки сформулировали собственные модели, в которых результат не зависит от размера конечного элемента [11]. Наряду с влиянием конечно-элементной сетки также отмечалось, что на протекание процесса разрушения влияет разброс прочностных свойств в элементах структуры [12, 13].

В рамках настоящей работы рассматриваются особенности формирования условий макроразрушения при различных характеристиках закона распределения случайных прочностных констант. Для решения используется двухуровневая структурно-феноменологическая модель [14]. Численное решение математической модели реализовано через поэтапный процесс разрушения, описанный на языке программирования APDL. Алгоритм описания процесса деформирования и разрушения включает в себя построение конечно-элементной модели исследуемой области, приложение граничных условий в перемещениях и расчет напряженно-деформированного состояния. Происходит выборка элементов, удовлетворяющих критерию разрушения с последующей деградацией жёсткости материала, вследствие чего, элемент исключается из дальнейшего расчета. При этом, процесс деградации свойств в подвергнутых разрушению элементах производится единожды, а новые свойства применяются на следующей итерации. За одну итерацию разрушается только один конечный элемент. Численный расчёт продолжается до образования сквозной магистральной трещины.

Стохастичность процесса разрушения рассматривается на примере одноосного растяжения однородных квадратной пластины с длиной стороны $L=0.2$ м, нижняя грань которой закреплялась по продольной оси y , левая грань закреплялась по оси x . При этом, растягивающие усилия в форме перемещения вдоль оси y прикладывались к верхней грани (рис. 2, а). Процесс разрушения проводился с разбросом прочностных свойств элементов по нормальному закону распределения со средним значением прочностных свойств $\sigma_{cp}=150$ МПа и коэффициентом вариации $K_v=0.52$.

В результате решения строится диаграмма деформирования, изображенная на рисунке 1 и картины зон разрушения (рис. 2), соответствующие точкам, отмеченным на рисунке 1. Наблюдаются стадии рассеянного накопления повреждения (рис. 2, а) когда дефекты распределены по объему пластины и фактически не взаимодействуют друг с другом; локализации процесса разрушения (рис. 2, б, в) при которой поле напряжений дефектов, оказавшиеся на некотором близком расстоянии начинает взаимодействовать и в пространстве между двумя близким дефектами возникает большая концентрация напряжений, что приводит к разрушению в этой области. В результате чего дефекты объединяются, образуя трещину большего размера, которая создает еще большую концентрацию напряжений. В дальнейшем трещины большего размера также начинают взаимодействовать и сливаться, образуя одну или несколько магистральных трещин (рис. 2, г, д), которые приводят к разрушению образца (рис. 2, е).

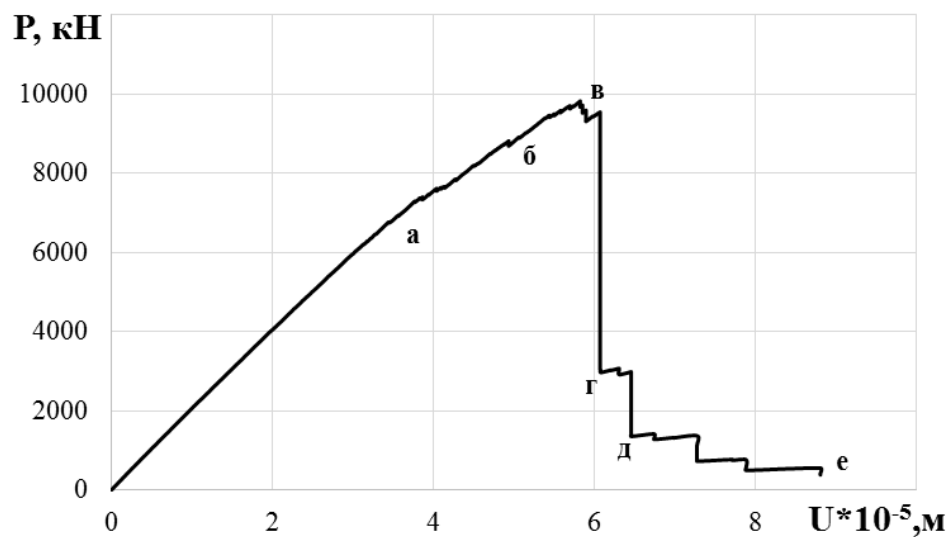


Рис.1. Расчетная диаграмма деформирования

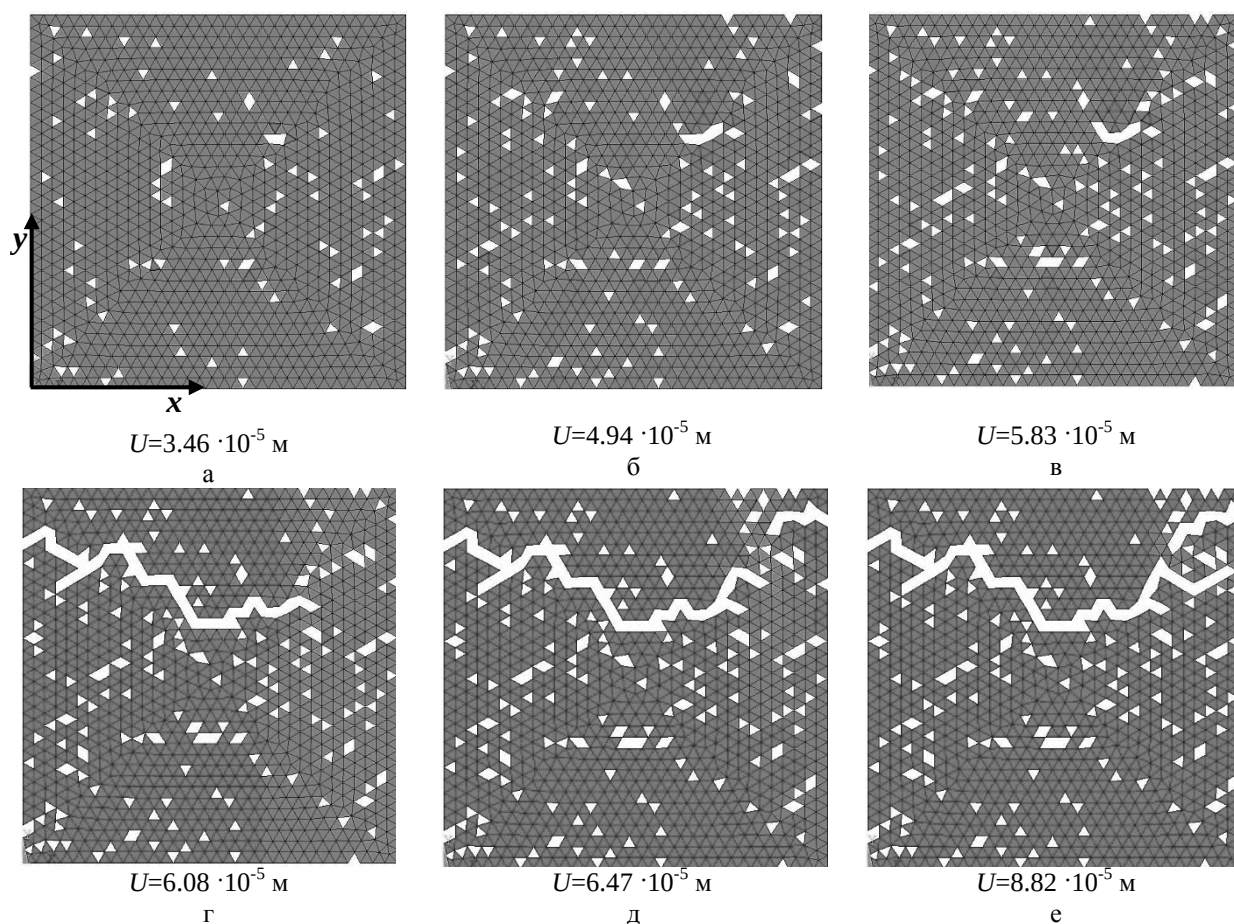


Рис.2. Картины зон разрушения, построенные точкам диаграммы деформирования (а-е), изображенной на рисунке 1

Таким образом, в данной работе проведен анализ научной литературы в области исследования параметров и подходов численной реализации процесса разрушения. На основе двухуровневой структурно-феноменологической модели разработан алгоритм, реализованный в виде программного кода на языке программирования APDL, описывающий процесс разрушения тел при случайном распределении прочности прочностных свойств конечных элементов. Получены данные численного моделирования процессов развития трещин в материале на основе используемой модели.

Литература

1. Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. — 156 с.
2. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное изучение закритического деформирования и разрушения сталей при высоких температурах // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2019. — № 1. — С.27–37.
3. Гучинский Р.В., Петин С.В. Прогнозирование развития четверть эллиптической трещины усталости с помощью конечно-элементного моделирования накопления повреждений// Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2015 8. Issue 7. — pp. 890-900
4. Гучинский Р.В., Петин С.В. Численное моделирование распространения полуэллиптической трещины усталости на основании оценки накопления повреждений // Вычисл. мех. сплош. сред. — 2015. — Т. 9, № 4. — С. 376-385.
5. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Зайцев А.В. Эволюция структурных повреждений и макроразрушение неоднородной среды на закритической стадии деформирования// Механика композиционных материалов. — 1997. — Т.33, № 3. —С. 329-339.
6. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1998. - 288 с.
7. Веретенников С.В., Баранов С.Н. Влияние параметров сетки на результаты численного моделирования// Прикладная математика, механика и процессы управления. — 2013. - №1. — С. 140-149.
8. Alshoaibi A.M., Hadi M.S., Ariffin A.K. An adaptive finite element procedure for crack propagation analysis//Journal of Zhejiang University. - 2007. — V. 8(2). — p. 228-236.
9. Zhang X.Q., Zhang X. Investigation of the influence of small hole on the fatigue crack growth path// J. Fail. Anal. And Preven. — 2016. — V.16. — P.391-399.
10. Королев И.К., Петин С.В., Фрейдин А.Б. Численное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в упругих материалах// Вычисл. мех. сплош. сред. — 2009. — Т. 2, № 3. — С. 34-43.
11. Bazant Z.P., Lusio G.D. Nonlocal microplane model with strain-softening yield limits// International Journal of Solids and Structures. — 2004 — V.41. — P.7209–7240
12. Ильиных А.В., Вильдеман В.Э. Моделирование структуры и процессов разрушения зернистых композитов // Вычисл. мех. сплош. сред. — 2012. — Т. 5, № 4. — С. 443-451.
13. Новоселов А.В., Вильдеман В.Э. Исследование характера процесса разрушения ортотропных пластин с концентраторами напряжений на базе вычислительного эксперимента// Вестник ПНИПУ. Механика. -2012.-№4-С. 33-78.
14. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1998. - 288 с.

**ПОСТРОЕНИЕ ПРОВЕРЯЮЩЕГО И ДИАГНОСТИЧЕСКОГО
ТЕСТОВ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ОБЪЕКТА ДИАГНОЗА**
*CONSTRUCTION OF VERIFICATION AND DIAGNOSTIC TESTS FOR
THE FUNCTIONAL DIAGRAM OF THE OBJECT OF DIAGNOSIS*

Филина О.А. - Ст. преподаватель, **Яшагина А.В.** - студ., **Иванов Н.С.** - студ.,
Колесов А.А. - студ.,

Казанский Государственный Энергетический Университет, Россия, г. Казань
olga_yuminova83@mail.ru

Abstract. This article is devoted to the problem of technical diagnostics in urban electric transport. To solve the problem, it is necessary to translate the qualitative determination of the TS on some quantitative basis. The formalization of qualitative definitions is a necessary condition for the construction of formal (computable) diagnostic algorithms.

Keywords: increase of reliability, spectral method, component, conversion process, method, operating time, fault, possible states.

Аннотация. Эта статья посвящена проблеме технической диагностики на городском электрическом транспорте и электрооборудовании. Для решения задачи необходим перевод качественного определения ТС на некоторую количественную основу. Формализация качественных определений является необходимым условием построения формальных (вычислимых) алгоритмов диагностики.

Ключевые слова: повышение надёжности, спектральный метод, компонент, процесс преобразования, методика, наработка, неисправность, возможные состояния, железнодорожная автоматика, телемеханика и связь.

Непрерывные системы *железнодорожной автоматики, телемеханики и связи* (ЖАТС) имеют особенности, которые позволяют при их анализе отдать предпочтение логическим моделям. Применение логических моделей связано с допусковыми методами контроля, которые характеризуются тем, что заключение о техническом состоянии объекта составляют по результатам оценки значений сигналов в контрольных точках (значений контролируемых параметров объекта). Результаты контроля параметров при этом приводятся к оценкам вида: «в допуске – не в допуске», «в норме – не в норме», иначе говоря, к оценкам двужначного типа (нуль или единица). Отсюда следует, что в этих случаях удобно применять модели логического типа и различные логические методы.

На первом этапе построения логической модели в системе выделяют отдельные функциональные элементы, входы и выходы которых доступны для измерения [1].

На втором этапе построения модели составляют функциональную схему системы как объекта диагноза, в которой указывают все выделенные элементы и связи между ними.

Функциональная схема объекта диагноза (рис. 1) содержит восемь элементов — Э1 — Э8, имеет четыре внешних входных воздействия — $x_1 - x_4$, и формирует четыре выходные реакции — y_5, y_6, y_7, y_8 . Каждый элемент формирует свою выходную реакцию y_i , причем выходные реакции элементов Э5, Э6, Э7, Э8 совпадают с выходными реакциями схемы. Примем, что $x_i=1$ и $y_i=1$, если i -е входное воздействие или выходная реакция j -го элемента являются допустимыми; в противном случае $x_i = 0$ и $y_i = 0$.

Ограничимся рассмотрением только одиночных неисправностей, поэтому система имеет девять состояний:

$$\begin{aligned} S_0 &= 11111111, & S_1 &= 01111111, & S_2 &= 10111111, \\ S_3 &= 11011111, & S_4 &= 11101111, & S_5 &= 11110111, \\ S_6 &= 11111011, & S_7 &= 11111101, & S_8 &= 11111110. \end{aligned}$$

При работе с логической моделью предполагается, что на входы объекта поступает единственное входное воздействие, определяемое допустимыми значениями всех входных сигналов [2].

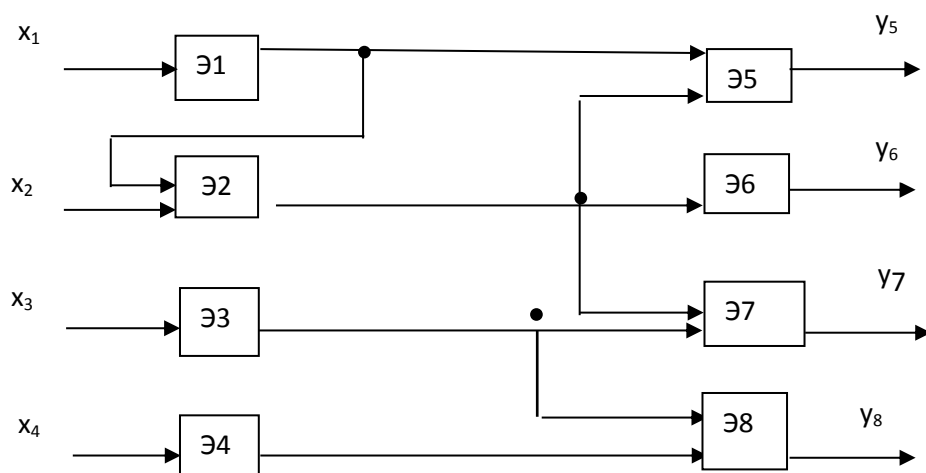


Рис. 1 Функциональная схема объекта диагноза

Поэтому возможные элементарные проверки отличаются только наборами контрольных точек, в которых осуществляется измерение. В этом случае задача построения алгоритма диагноза сводится к выбору совокупности контрольных точек, достаточной для решения определенной задачи диагноза. На практике большое число проверок не может быть осуществлено, так как нет доступа к выходам некоторых элементов; невозможно подключиться сразу к выходам нескольких элементов и т.п.

В рассматриваемом случае будем считать, что возможны только те проверки, которые заключаются в измерении реакции на выходе одного из элементов системы, причем для измерения доступны выходы всех элементов. Обозначим элементарную проверку как π_i – это контроль реакции на выходе i -го элемента ($i \in \{1, 2, \dots, 7\}$).

В табл. 1 приведена таблица функций неисправностей (ТФН), составленная для системы (см. рис. 1) [3].

Таблица 1

Проверка	Результат R проверки для системы, находящейся в состоянии								
	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
π_1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
π_2	1	0	0	1	1	1	1	1	1
π_3	1	1	1	0	1	1	1	1	1
π_4	1	1	1	1	0	1	1	1	1
π_5	1	0	0	1	1	0	1	1	1
π_6	1	0	0	1	1	1	0	1	1
π_7	1	0	0	0	1	1	1	0	1
π_8	1	1	1	0	0	1	1	1	0

Когда система исправна (состояние S_0), на выходах всех элементов имеют место допустимые значения сигналов. Отказ какого-либо элемента вызывает появление недопустимого значения сигнала на его выходе и на выходах всех связанных с ним элементов.

Данная ТФН содержит всю необходимую информацию для построения проверяющего и диагностического тестов. Каждая графа ТФН задает некоторую функцию, определяемую на множестве проверок. Функция равна единице, если проверка

дает допустимый результат. Обозначим F – функция исправного объекта; f_i – функция i -го состояния неисправного объекта или функция i -той неисправности. Например, имеем:

$$\begin{aligned} F &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_3 \vee \pi_4 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7 \vee \pi_8, \\ f_1 &= \pi_3 \vee \pi_4 \vee \pi_8, & f_2 &= \pi_1 \vee \pi_3 \vee \pi_4 \vee \pi_8, \\ f_3 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_4 \vee \pi_5 \vee \pi_6, & f_4 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_3 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7, \\ f_5 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_3 \vee \pi_6 \vee \pi_7 \vee \pi_8, \\ f_6 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_3 \vee \pi_4 \vee \pi_5 \vee \pi_7 \vee \pi_8, & f_7 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_3 \vee \pi_4 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_8, \\ f_8 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_3 \vee \pi_4 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7 \end{aligned}$$

При построении теста T_n для каждой неисправности вычисляют проверяющую функцию:

$$\varphi_i = F \oplus f_i. \quad (1)$$

Функция $\varphi_i = 1$ только на тех проверках, на которых результаты проверок различны для исправной схемы и для схемы с i -той неисправностью. Иначе говоря, она объединяет те проверки, на которых i -тая неисправность обнаруживается [4].

Проверяющий тест

$$T_n = \varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_n, \quad (2)$$

где n – число неисправностей.

В данном случае $n = 8$.

Для того чтобы найти φ_i складываем полученные значения по формуле (1) и получаем:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7, & \varphi_2 &= \pi_2 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7, \\ \varphi_3 &= \pi_3 \vee \pi_7 \vee \pi_8, & \varphi_4 &= \pi_4 \vee \pi_8, \\ \varphi_5 &= \pi_5, & \varphi_6 &= \pi_6, & \varphi_7 &= \pi_7, & \varphi_8 &= \pi_8 \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} T_n &= \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \varphi_5 \varphi_6 \varphi_7 \varphi_8 = \\ &= (\pi_1 \vee \pi_2 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7) (\pi_2 \vee \pi_5 \vee \pi_6 \vee \pi_7) (\pi_3 \vee \pi_7 \vee \pi_8) (\pi_4 \vee \pi_8) \pi_5 \pi_6 \pi_7 \pi_8 \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (2) может быть упрощено на основе закона поглощения, который характеризуется следующими равенствами:

$$\begin{aligned} a(a \vee b) &= aa \vee ab = a \vee ab = a(1 \vee b) = a \times 1 = a, \\ (a \vee b)(a \vee b \vee c) &= a \vee b, \end{aligned}$$

или в общем случае

$$(G_1 \vee G_2)(G_1 \vee G_3) = G_1, \quad (4)$$

где G_1, G_2, G_3 – любые логические функции.

По действиям:

$$\begin{aligned}
1) & (\pi_6) \times (\pi_6 + \pi_7) = \pi_6 \times \pi_6 + \pi_6 \times \pi_7 = \pi_6 \times (1 + \pi_7) = \pi_6 \\
2) & (\pi_6) \times (\pi_6 + \pi_8) = \pi_6 \times \pi_6 + \pi_6 \times \pi_8 = \pi_6 \times (1 + \pi_8) = \pi_6 \\
3) & (\pi_6) \times (\pi_4 + \pi_6) = \pi_6 \times \pi_4 + \pi_6 \times \pi_6 = \pi_6 \times (1 + \pi_4) = \pi_6 \\
4) & (\pi_1 + \pi_5) \times (\pi_1 + \pi_5) = \pi_1 + \pi_5 \\
5) & (\pi_1 + \pi_5) \times (\pi_1 + \pi_2 + \pi_5) = \pi_1 \times (\pi_1 + \pi_2 + \pi_5) + \pi_5 \times (\pi_1 + \pi_2 + \pi_5) = \pi_1 \times (1 + \pi_2 + \pi_5) + \pi_5 \times (1 + \pi_2 + \pi_5) = \\
& = \pi_1 + \pi_5
\end{aligned} \tag{5}$$

В результате получаем 2 проверочных теста:

$$\begin{aligned}
T_{П1} &= \pi_6 \times \pi_1 \\
T_{П2} &= \pi_6 \times \pi_5
\end{aligned} \tag{6}$$

Из уравнения следует, что для полной проверки системы необходимо и достаточно одновременно подать на внешние входы элементов 1 и 6 или 6 и 5 допустимые воздействия и измерить реакцию на выходе. Если система исправна, то на выходе элемента будет допустимый сигнал, если же неисправна, то на выходе элемента будет недопустимый сигнал [5].

В общем случае для проверки исправности или работоспособности объекта достаточно проконтролировать все его внешние выходы. Однако логическая модель и ТФН позволяют найти такую минимальную совокупность проверок, в которую не войдут внешние выходы объекта, являющиеся также входами блоков модели.

При решении задачи поиска неисправного элемента строят диагностический тест Тд. Для каждой пары неисправностей (с номерами i и j) вычисляют различающую функцию:

$$\phi_{i,j} = f_i \oplus f_j \tag{7}$$

Различающая функция, полученная по выражению (7) равна единице только на тех проверках, на которых результаты проверок различны для схемы с i -й неисправностью и для схемы с j -й неисправностью. Иначе говоря, она объединяет те проверки, на которых i -я и j -я неисправности различаются друг от друга.

Выводы. Была рассмотрена проблема технической диагностики на городском электрическом транспорте и электрооборудовании. Для решения задачи был произведен перевод качественного определения ТС на некоторую количественную основу. Формализация качественных определений является необходимым условием построения формальных (вычислимых) алгоритмов диагностики.

Литература

1. Михайловский А.Е., Яшагина А.В. Разработка программных комплексов контроля и диагностики состояния энергетических объектов с помощью теории шкал / В сборнике: Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы Сборник материалов VIII Международной молодежной научной конференции. 2018. С. 369-372.
2. Филина О.А. Повышение эффективности щеткодержателей / В мире научных открытий. 2010. № 6-1 (12). С. 227-230.
3. Филина О.А., Рылов Ю.А., Степанов Е.Л. Исследование ресурса электрощёток тяговых электрических машин / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 1. С. 320-323.
4. Филина О.А., Степанов Е.Л. Техническая диагностика газотранспортного оборудования, городского электрического транспорта и железнодорожного транспорта / Наука и современность. 2014. № 29. С. 200-205.
5. Филина О.А. Техническое состояние изделия и его бездемонтажная диагностика / В сборнике: Наука сегодня сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Научный центр «Диспут». 2014. С. 74.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛИ 8Х4В9Ф2-Ш

INVESTIGATION OF VACUUM CARBURIZING OF STEEL C0,8Cr4W9V2

Цинколенко О.А.¹, Золотов Б.С.², Шебешев К.И.³, Пахомова С.А.⁴

Tsinkolenko O., Zolotov B., Shebeshev K., Pakhomova S.A.

^{1, 2, 3} студент, ⁴ доцент

^{1, 2, 3, 4} Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Bauman Moscow State Technical University

³ vladisl-2013@yandex.ru, ⁴ mgtu2013@yandex.ru

Abstract. The paper discusses the technological process of vacuum carburizing of steel C0,8Cr4W9V2, used for rolling bearings operating in aggressive environments. Investigated the diffusion layer consisting of the carbonitride active zone, martensite and residual austenite. Shown the negative influence of residual austenite on properties of the surface. Methods of microanalysis studied the structure of carbonitride layer. Shows the distribution of measurement results for the total layer thickness and for the thickness of the active carbonitride layer. It is established that the distribution of values of the characteristics of diffusion layers corresponds to the normal law. It is noted that the scattering characteristics of the diffusion layers is small and is kept when changing processing mode. Evaluated the stability of the parameters of the diffusion layers.

Key words: vacuum carburization, bearings, microstructure, diffusion layer, hardness.

Аннотация. В работе рассмотрен технологический процесс вакуумной цементации стали 8Х4В9Ф2-Ш, применяемой для подшипников качения, работающих в агрессивных средах. Исследован диффузионный слой, состоящий из активной карбонитридной зоны, мартенсита и остаточного аустенита. Показано отрицательное влияние остаточного аустенита на свойства поверхности. Методами микроанализа изучена структура нитроцементованного слоя. Представлено распределение результатов измерений для общей толщины слоя и для толщины активного карбонитридного слоя. Установлено, что распределение значений характеристик диффузионных слоев соответствует нормальному закону. Отмечено, что рассеяние характеристик диффузионных слоев мало и сохраняется при изменении режима обработки. Оценена стабильность параметров диффузионных слоев.

Ключевые слова: вакуумная цементация, подшипники, микроструктура, диффузионный слой, твердость.

Введение. В аэрокосмической, автомобильной, горнодобывающей и других сферах промышленности, ответственные детали машин (в частности – зубчатые колеса, валы, кольца подшипников и др.) работают в тяжелых условиях, а именно: воздействие агрессивной среды, высокие рабочие температуры, высокие нагрузки (статические, динамические, циклические). Под действием этих факторов в подповерхностных слоях возникают микротрещины, которые выходят на поверхность и приводят к образованию усталостного выкрашивания металла [1]. В таких условиях эксплуатации от деталей требуется, прежде всего, высокая контактная прочность и высокая поверхностная твердость при сохранении достаточно вязкой сердцевины. Улучшение эксплуатационных свойств материала возможно с помощью химико-термической обработки [2,3].

В настоящее время широкий интерес проявляется к исследованию технологических процессов вакуумной цементации и нитроцементации. Вакуумная химико-термическая обработка интенсифицирует диффузионное насыщение, сокращая длительность процесса, повышает качество поверхностных диффузионных слоев, снижает расход электроэнергии и технологических сред [4-6]. Нитроцементация является более перспективной, так как в

присутствии азота диффузионная подвижность углерода в аустените резко увеличивается, также снижается температура полиморфного превращения, что позволяет вести процесс насыщения поверхностного слоя при более низких температурах, чем при цементации, что в свою очередь снижает коробление и длительность процесса [7].

Несмотря на все преимущества вакуумной нитроцементации, данный процесс является недостаточно исследованным, так как необходимо установление закономерностей, отражающих влияние технологических параметров на характеристики диффузионного слоя. Наиболее эффективным способом оценки влияния технологических параметров является математическое моделирование, с помощью которого можно подобрать оптимальный режим процесса насыщения. В настоящее время разработано программное обеспечение [8], позволяющее смоделировать процесс нитроцементации, однако, оно применимо к узкому классу сталей. Помимо отсутствия универсальных программ для моделирования процессов нитроцементации, существует также проблема разработки стабильных по свойствам (твердость поверхности, толщина диффузионного слоя) технологических процессов химико-термической обработки.

Целью работы является оценка стабильности параметров диффузионных слоев приборных подшипников из стали 8X4B9Ф2-III после вакуумной нитроцементации, а также оценка технологического уровня процесса вакуумной нитроцементации.

Методика проведения эксперимента.

Для проведения исследований использовали образцы, изготовленные из горячекатаной дисперсионно-твердеющей стали марки 8X4B9Ф2-III. Данная сталь относится к классу конструкционных высоколегированных среднеуглеродистых сталей. Область применения: изготовление подшипников качения, работающих в агрессивных средах при повышенных температурах (до 500 °С). Химический состав стали марки 8X4B9Ф2-III представлен в таблице 2.

*Таблица 1
Химический состав стали марки 8X4B9Ф2-III*

Содержание химического элемента, %								
C	Si	Mn	Cr	W	V	S	P	Fe
0,70-0,80	≤ 0,25	≤ 0,25	4,00-4,60	8,50-9,50	1,40-1,70	≤ 0,03	≤ 0,03	Ост.

Образцы исследовались после проведения вакуумной нитроцементации в лабораторной установке для проведения вакуумной химико-термической обработки по двум технологическим режимам:

- 1). Вакуумная нитроцементация при температуре 940 °С в течение 100 минут: активная стадия – 5 циклов по 10 минут, пассивная стадия – 5 циклов по 10 минут (ВНЦ1);
- 2). Вакуумная нитроцементация при температуре 940 °С в течение 150 минут: активная стадия – 5 циклов по 15 минут, пассивная стадия – 5 циклов по 15 минут (ВНЦ2).

Исследовали микроструктуру и измеряли толщину диффузионного слоя на микроскопе Olympus GX51. Твердость поверхности измеряли по методу Роквелла.

Статистическая обработка результатов была проведена с помощью программы Microsoft Excel. Грубые измерения исключались из выборки по правилу 3σ [9]. Стабильность свойств диффузионных слоев оценивалась по параметрам распределения и по схожести его с нормальным распределением Гаусса [10]. Проверка гипотезы о соответствии распределения результатов измерений нормальному проводилась двумя методами: графически и аналитически [11].

Результаты экспериментов и обсуждение. Исследование микроструктуры показало, что активный карбонитридный слой (рис. 1) представляет собой зону с развитой карбонитридной составляющей. Слой содержит больше количество мелкодисперсных

соединений легирующих элементов с азотом и углеродом, что придает ему высокую твердость. Данный слой отвечает за работоспособность подшипников скольжения, так как воспринимает все нагрузки.

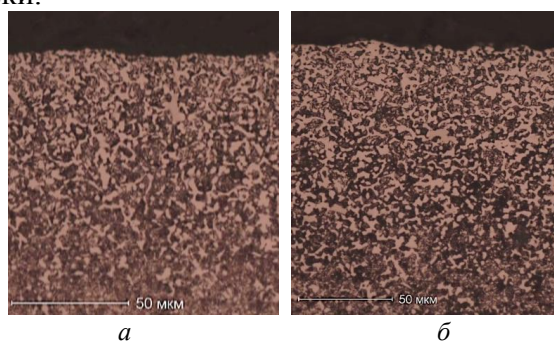


Рис. 1. Микроструктура образцов (x500) после проведения вакуумной нитроцементации: а – режим ВНЦ1; б – режим ВНЦ2

Анализ микроструктуры выявил, что образец после обработки по режиму ВНЦ2 содержит большее количество остаточного аустенита, что должно негативно сказаться на эксплуатационных свойствах диффузионного слоя.

Результаты измерения твердости по методу Роквелла в виде графиков типа «BoxPlot» представлены на рисунке 2.

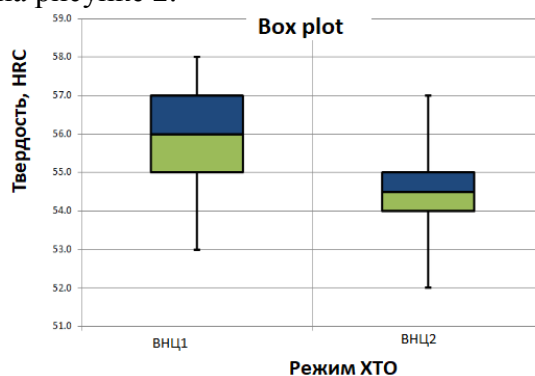


Рис. 2. Результаты измерения твердости

Измерение твердости показало, что образцы, обработанные по режиму ВНЦ2, имеют пониженную поверхностную твердость по сравнению с образцами, обработанными по режиму ВНЦ1. Исходя из анализа микроструктуры образцов, снижение твердости после обработки по режиму ВНЦ2 связано с большим количеством остаточного аустенита в структуре.

Результаты измерения толщины диффузионного слоя в виде графиков типа «BoxPlot» представлены на рисунке 3.

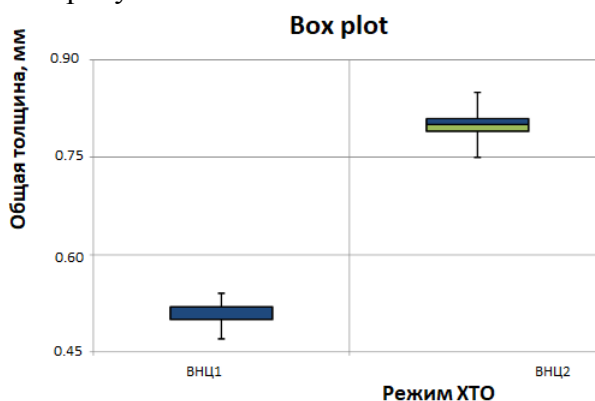


Рис. 3. Результаты измерения общей толщины слоя

Анализ результатов измерений общей и активной толщины диффузионных слоев

позволяет сделать вывод о том, что с увеличением продолжительности обработки, увеличивается как общая, так и активная толщина диффузионного слоя.

Заключение. Анализ микроструктуры и результатов измерения поверхностной твердости образцов из стали 8Х4В9Ф2-Ш показал, что более длительная выдержка снижает твердость. Это связано с наличием в образцах повышенного содержания остаточного аустенита.

Установлено, что распределение значений характеристик диффузионных слоев соответствует нормальному закону. Отмечено, что рассеяние характеристик диффузионных слоев мало и сохраняется при изменении режима обработки, что свидетельствует о стабильности результатов.

Литература

1. Арзамасов Б. Н. Циркуляция и ионизация газовой среды при химико-термической обработке / Арзамасов Б. Н. // Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов : сб. науч. тр. / ред. Арзамасов Б. Н. М., 2003. С. 39-44.
2. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 450 с.
3. Елисеев Ю. С., Абраимов Н. В., Крымов В. В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении : учеб. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 1999. 524 с.
4. Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С., Макушина М.А., Пикалов А.И., Усова В.В., Юшин Н.А. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации // Вестник научно-технического развития. 2016. № 9 (109). С. 19-28.
5. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. 256 с.
6. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 8. С. 22-27.
7. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization // Solid State Phenomena. 2016. Т. 870. С. 383391.
8. Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю., Пахомова С.А. Износостойкость теплостойкой стали после вакуумной цементации // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 7 (139). С. 813.
9. Пахомова С.А., Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю. Особенности вакуумной цементации деталей для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2016. № 3. С. 108116.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.
11. Степнов. М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПАКЕТА
НАНОБАЛОК БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА С ЗАЗОРОМ МЕЖДУ НИМИ¹**
*THE CONTACT INTERACTION OF THE TWO-LAYER PACKAGE OF
BERNULLY-EYLER NANOBEAMS WITH A GAP BETWEEN THEM*

Т.В. Яковлева – к.ф.-м.н., доцент, **В.С. Кружилин** – аспирант,

В.А. Крысько-мл. – аспирант

СГТУ имени Гагарина Ю.А

yan-tan1987@mail.ru

Abstract. A mathematical model of the contact interaction of two parallel Bernoulli – Euler nanobeams with a small gap between them is constructed on the basis of a modified couple stress theory. Contact interaction is taken into account according to the theory of B.Ya. Cantor. The influence of the size-dependent coefficient on the contact interaction and the nature of the oscillations is studied. To solve and analyze the methods of the qualitative theory of differential equations, wavelet analysis, methods of analyzing the sign of the Lyapunov exponent are used.

Key words: contact interaction, nonlinear oscillations, Bernoulli-Euler beam nanostructure, Lyapunov exponents, NEMS, Bubnov-Galerkin method, finite difference method.

Аннотация. В работе построена математическая модель контактного взаимодействия двух параллельных нанобалок Бернулли–Эйлера с малым зазором между ними на основе модифицированной моментной теории. Контактное взаимодействие учитывается согласно теории Б.Я. Кантора. В работе изучено влияние величины размерно-зависимого коэффициента на контактное взаимодействие и характер колебаний. Для решения и анализа применяются методы качественной теории дифференциальных уравнений, вейвлет-анализ, методы анализа знака старшего показателя Ляпунова.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, нелинейные колебания, балочная наноструктура Бернулли–Эйлера, показатели Ляпунова, НЭМС, метод Бубнова–Галеркина, метод конечных разностей.

Механические многослойные системы из микро- и наноразмерных балок с зазорами между ними являются составными элементами современных устройств, применяемых в самых различных областях: машиноведении, приборостроении, авиакосмической промышленности, медицине, гироскопии. Микро- и наноразмерные балки во время эксплуатации подвержены внешнему воздействию различного характера, что оказывает существенное влияние на точность и надежность работы всего устройства. Зазор, имеющийся между элементами системы, зачастую приводит всю конструкцию в состояние колебаний хаотического характера даже при наличии незначительного прогиба. Поведение системы при контактном взаимодействии её элементов друг с другом является актуальным вопросом. В работах [1, 2] изучаются вопросы колебательного режима в результате контактного взаимодействия балок. Классическая механика твёрдого тела не в состоянии учесть размерно-зависимое поведение многослойной микро- и наносистемы в силу отсутствия параметра учёта эффекта масштабирования. В настоящее время построены различные теории, которые позволяют моделировать масштабные эффекты в континууме. Среди них стоит выделить нелокальную, модифицированную моментную, поверхностную и градиентную теории упругости. Разнообразие научных исследований на различные темы, связанные с учётом контактного взаимодействия элементов многослойной системы с зазором между ними (теории масштабирования; внешние влияющие факторы; модели контактного взаимодействия) в полной мере показывают важность темы, её многогранность и множество сфер для применения систем.

¹ Работа поддержана РФФИ, проекты № 19-31-90131, 18-38-00878 мол_a

В работах [3-6] построены математические модели размерно-зависимых и геометрически нелинейных балок, пластин и оболочек. Однако, в них не изучено контактное взаимодействие нанобалок.

Постановка задачи.

В работе построена математическая модель двухслойной наносистемы, которая состоит из двух параллельных нанобалок, соединенных между собой через краевые условия, под действием поперечной нагрузки. Чертеж балочной конструкции приведен на рис. 1.

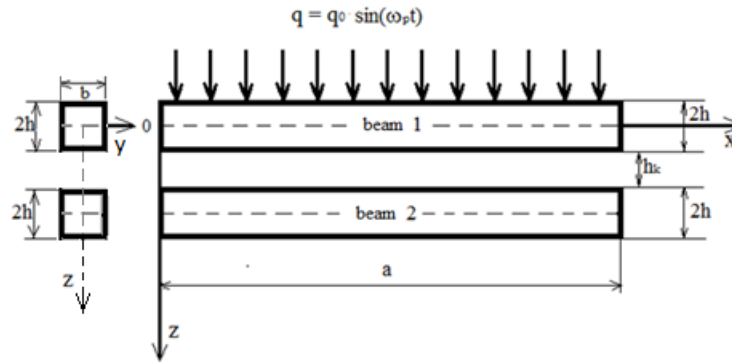


Рис.1. Расчётная схема

Рассматриваемая нами балочная структура представлена в виде двумерной области пространства R^2 в декартовой прямоугольной системе координат: в теле нанобалки 1 проводится срединная линия $z = 0$, ось OX устремляется слева направо вдоль срединной линии, ось OZ направляется вниз, перпендикулярно оси OX . В обозначенной системе координат пакет из двух балок - двумерная область $\Omega = \{x \in [0, a]; -h \leq z \leq h_k + 3h\}$, $0 \leq t \leq \infty$ (см. рис. 1). Для построения математической модели контактного взаимодействия двух нанобалок применены следующие гипотезы и предположения: нанобалки однослойные, изотропные, упругие и подчиняются закону Гука; продольный размер нанобалок значительно превышает их поперечные размеры единичной толщины; контактное давление принимается по модели Кантора Б.Я. [7]; нормальные напряжения на площадках, которые параллельны оси, пренебрежимо малы; геометрическая нелинейность определяется в форме Т. Кармана [8]; размерно-зависимые эффекты определяются по модифицированной моментной теории, предложенной Янгом [9]. Для построения модели контактного взаимодействия наноразмерных балок по модели Кантора Б.Я. в их уравнения необходимо ввести слагаемое $(-1)^i K(w_1 - w_2 - h_k)\Psi$, в котором через $i = 1, 2$ обозначены номера нанобалок, функция Ψ определена формулой $\Psi = \frac{1}{2}[1 + \text{sign}(w_1 - h_k - w_2)]$, то есть $\Psi = 1$, если есть контакт между нанобалками - $w_1 > w_2 + h_k$, иначе контакт отсутствует. Через K обозначается коэффициент жесткости трансверсального обжатия структуры в зоне контакта, а через h_k определяется зазор между нанобалками.

Уравнения движения нанобалок с учетом гипотезы первого порядка, граничными и начальными условиями выведены из энергетического принципа Гамильтона – Остроградского. Уравнения движения двухслойного пакета нанобалок Бернулли - Эйлера в перемещениях с учетом диссипации энергии записываются в следующем виде:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{p_1}{\gamma_1^2} \{L_2(w_i, w_i) + L_1(u_i, w_i)\} - \left\{ \frac{p_1}{2\gamma_1^2} + \frac{p_2\gamma_2^2}{2\gamma_1^2} \right\} \frac{\partial^4 w_i}{\partial x^4} + q_i(t) - \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial w_i}{\partial t} + \\ & \quad + (-1)^i K(w_1 - w_2 - h_k) \Psi = 0, \\ & p_1 \left\{ \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + L_3(w_i, w_i) \right\} - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\text{здесь } L_1(u_i, w_i) = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \frac{\partial w_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial x} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2}, \quad L_2(w_i, w_i) = \frac{3}{2} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} \right)^2, \quad L_3(w_i, w_i) = \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} \frac{\partial w_i}{\partial x}$$

- нелинейные операторы, u_i, w_i – функции перемещений и прогибов верхней и нижней нанобалок соответственно, $i = 1, 2$, $p_1 = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $p_2 = \frac{1}{2(1+\nu)}$, $\gamma_1 = \frac{a}{2h}$, $\gamma_2 = \frac{l}{2h}$, l – параметр, появляющийся в моменте высшего порядка.

К уравнениям (1) следует присоединить краевые и начальные условия. Далее система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных сводится методом конечных разностей с аппроксимацией $O(h^2)$ к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение полученной задачи Коши по времени проводится различными методами семейства Рунге-Кутты (Рунге-Кутты Принса-Дорманда восьмого порядка, метод Кеш-Карпа четвертого порядка, методы Рунге-Кутты второго и четвертого порядков, метод Рунге-Кутты Фелберга четвертого порядка, неявные методы Рунге-Кутты второго и четвертого порядков). При изучении вопросов контактного взаимодействия необходимо выявлять основные частоты колебательного процесса, так как при соприкосновении балок будет происходить переход колебаний структуры к хаосу.

Численный эксперимент.

В качестве примера рассмотрим балочную наноструктуру со следующими параметрами: длина $a = 200\text{ нм}$, толщина $2h = 4\text{ нм}$, модуль упругости $E = 1.7233 \cdot 10^{-15} \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{нм}^2$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, зазор $h_k = 0.04\text{ нм}$.

Искомая система (1) сводится к безразмерному виду с помощью следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \frac{w}{2h}, \quad \bar{u} = \frac{ua}{(2h)^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{a}, \quad \lambda = \frac{a}{(2h)}, \quad \bar{q} = q \frac{a^4(1-\nu^2)}{(2h)^4 E}, \\ \bar{t} &= \frac{t}{\tau}, \quad \tau = \frac{a}{c}, \quad c = \sqrt{\frac{Eg}{(1-\nu^2)\rho}}, \quad \bar{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 \frac{a}{c}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь g – ускорение свободного падения, ρ – плотность.

В качестве краевых условий выбрано жесткое защемление обоих концов нанобалок:

$$w_i(0, t) = w_i(1, t) = u_i(0, t) = u_i(1, t) = \frac{\partial w_i(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial w_i(1, t)}{\partial x} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

и нулевые начальные условия.

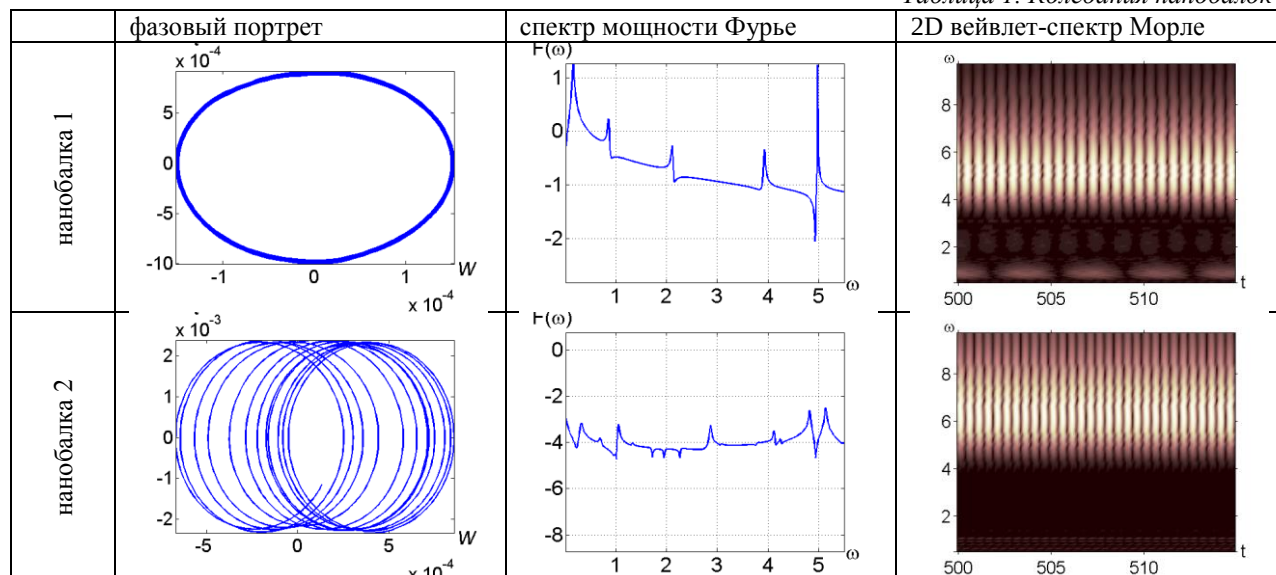
На верхнюю нанобалку действует знакопеременная поперечная нагрузка, распределенная по поверхности:

$$q = q_0 \sin(\omega_p t), \quad (4)$$

где q_0 – амплитуда, $\omega_p = 5.1$ – частота вынуждающих колебаний.

В результате контактного взаимодействия нанобалок ($\gamma_2 = 0.3$) их сложные колебания носят хаотический характер на основных частотах: $\omega_p = 5.1, \omega_1 = 0.95, \omega_2 = 2.05, \omega_3 = 3.95$ (табл. 1).

Таблица 1. Колебания нанобалок



Выводы

В работе построена математическая модель контактного взаимодействия двухслойной наносистемы, которая состоит из двух параллельных нанобалок, соединенных между собой через краевые условия, под действием поперечной нагрузки. В результате контактного взаимодействия нанобалок характер их сложных колебаний становится хаотическим.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 19-31-90131, 18-38-00878 мол_a

Литература

1. Narayan A.D., Ben Zineb T., Polit O., Pradyumna B., Ganapathi M. Large amplitude free flexural vibrations of functionally graded graphene platelets reinforced porous composite curved beams using finite element based on trigonometric shear deformation theory // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2019. Vol. 116. – P.302-317.
2. J. Comput. Nonlinear Dynam. Aug 2018, 13(8): 081005, doi.org/10.1115/1.4040540
3. Krysko A. V., Awrejcewicz J., Pavlov S. P., Bodyagina K. S., Zhigalov M. V., Krysko V. A. Non-linear dynamics of size-dependent Euler–Bernoulli beams with topologically optimized microstructure and subjected to temperature field // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2018.
4. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Krysko V.A. Chaotic dynamics of the size-dependent non-linear micro-beam model // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 2017. No 50. P. 16–28.
5. Krysko V.A., Awrejcewicz, J., Dobriyan, V., Papkova, I.V. Sizedependent parameter cancels chaotic vibrations of flexible shallow nanoshells // Journal of Sound and Vibration. 2019. 446, P. 374-386.
6. J. Awrejcewicz, V. A. Krysko Jr., T. V. Yakovleva, S. P. Pavlov, V. A. Krysko Nonlinear dynamics of contact interaction of a size-dependent plate supported by a size-dependent beam. Chaos 28, 053102 (2018).
7. Кантор Б.Я., Богатыренко Т.Л., Метод решения контактных задач нелинейной теории оболочек // Докл. АН УССР. сер. А. 1986. №1. С.18-21.
8. Karman Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau // Encykle. D. Math. Wiss. 1910. Vol. 4, №4, P. 311 – 385.
9. Mindlin R.D., Tiersten H.F. Effects of couple-stresses in linear elasticity // Archive for Rational Mechanics and Analysis. 11 (1962). P. 415–448.