

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средствам массовой коммуникации (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год
ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкций и производство летательных аппаратов, 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности],
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ, 05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность],
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 Материаловедение (по отраслям)]

Подписной индекс в каталоге
НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www.unitech-mo.ru

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Информационно-технологический вестник», допускается только с письменного разрешения редакции.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Ушакова К.О., Исаев В.Г.
РИСКИ И УГРОЗЫ ПРИ РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА.....3

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Артюшенко В.М., Воловач В.И.
МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕГАУССОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И ПРОЦЕССОВ.....15

Семенов А.Б., Аббасова Т.С.
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДМИНИСТРИРОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ LC-РАЗЪЕМА.....22

Стрелалюк Ю.В.
ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДИКИ НАУЧНОЙ РАБОТЫ (ИССЛЕДОВАНИЯ).....33

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кравчук А.С., Кравчук А.И.
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГИБОВ КРУГЛЫХ ПЛАСТИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКИ.....40

Сабо С.Е., Донской А.Д., Бугай И.В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЛИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ ЧАСТЬ 2 (СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ).....50

Скрябин М.Л., Чупраков А.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ КАМНЕВИДНОГО ИЗЛОМА СТАЛИ 35ХГСЛ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ВЫПЛАВКЕ.....55

Чесноков А.В., Тимофеев И.А., Грачев Ф.А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕТЕННЫХ СТРУКТУР ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ.....65

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
2. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
3. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
4. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
5. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
6. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
7. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
8. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
9. **Смердов А.А.**, д.т.н., профессор
10. **Стрелянюк Ю.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 20.09.2019

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 4,8

Тираж 500 экз.

Заказ № 75-18

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

УДК 629.7: 334.01

**Риски и угрозы при решении вопросов импортозамещения
в авиационно-космическом сегменте
военно-промышленного комплекса**

К.О. Ушакова, инженер-конструктор 2 категории,
АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,
г. Королев, Московская область,

В.Г. Исаев, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Управления качеством и стандартизации»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Показано, что в настоящее время существует проблема «Организация процесса импортозамещения при разработке образцов авиационной и ракетно-космической техники проходит не так, как планировалось». Отмечено, что для создания современных отечественных образцов авиационной и ракетно-космической техники требуется увеличение количества и качества применяемой электронной компонентной базы отечественного производства. Представлены результаты SWOT-анализа эффективности мероприятий импортозамещения при создании отечественной электронной компонентной базы для авиационной и ракетно-космической техники.

Авиационное высокоточное оружие, импортозамещение, электронная компонентная база.

**Risks and threats in import substitution issues handling in aircraft
and space industry of military-industrial establishment**

K.O. Ushakova, the 2nd rank design engineer,
in Joint Stock Company «Corporation «Tactical Missiles»,
Korolev, Moscow region,

V.G. Isaev, Candidate of Technical Sciences, head of the Department of Quality
Management and Standardization,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

As shown, in present moment, some problem is being exist – the organization of import substitution process in aircraft and missile-and-space equipment development is going not that way as planned. It is mentioned that increasing of electronic component base quality used in domestic production is necessary in development of up-to-date domestic aircraft and missile-and-space equipment. The SWOT-analysis results of import substitution activities efficiency in electronic component base development for aircraft and missile-and-space equipment are given.

Aircraft high-precision weapon, import substitution, electronic component base.

Оборонно–промышленный комплекс (ОПК) является высокотехнологичным сектором российской экономики, который включает в себя промышленные предприятия, НИИ (научно–исследовательские институты), выполняющие оборонные исследования и производство. ОПК является ключевым сектором экономики, который обеспечивает безопасность и обороноспособность государства. В результате введенных санкций возникли угрозы национальной безопасности. Государство впервые за много лет столкнулось с реальной необходимостью импортозамещения. Для нивелирования возникших угроз была запущена программа импортозамещения.

Начиная с 90-х годов XX века основными векторами военного соперничества ведущих государств выбран приоритет роста характеристик АСП за счет использования новых технологий и разработок. Анализ, проведенный авторами показал, что в ходе военных конфликтов в Европе и на ближнем Востоке за последние 30 лет преимущественно использовались авиационные высокоточные средства поражения, доля которых возросла с 7% до 70% (рис. 1).

Российская Федерация занимает второе место в мире по объему экспорта вооружения и военной техники, в первую очередь авиационной, поэтому анализ продукции предприятий ОПК, особенно авиационной техники, на наличие в ней импортных материалов и комплектующих, а также способы его замены является одной из главных задач.

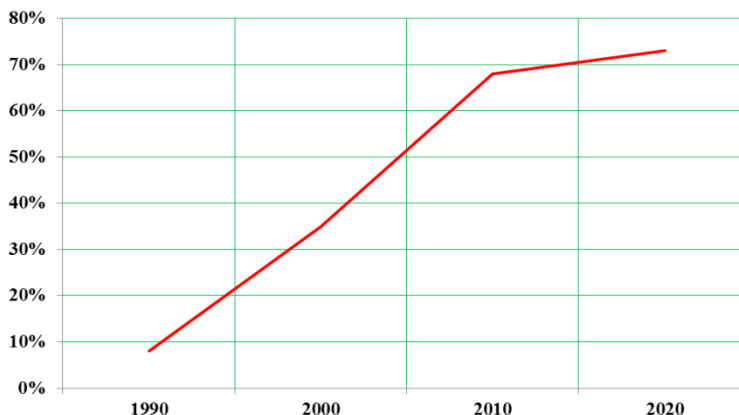


Рисунок 1 – Доля высокоточного оружия в применяемых средствах поражения авиацией ВС США и НАТО

На сегодняшний день во всех экономически развитых странах первоочередное внимание уделяется обеспечению имеющихся и перспективных авиационных комплексов высокоточным оружием. К ним в первую очередь относятся управляемые авиационные бомбы (УАБ), авиационные средства поражения (АСП), малогабаритные АСП (МАСП) и другие. Это вызвано тем, что в вооруженных силах главенствующая роль отводится военно-космическим силам, а в них в первую очередь боевой авиации, способной наносить точечные и высокоэффективные удары. Высокоточное оружие по эффективности не уступает ядер-

ному оружию малой мощности, но не имеет вредных экологических последствий. Все это подтверждается использованием военно-космических сил в борьбе с терроризмом (с международной террористической угрозой) в Сирийской Арабской Республике.

Обобщив мнения иностранных экспертов, можно сделать вывод, что УАБ по сравнению с обычными авиационными бомбами, обладают следующими преимуществами:

- 1) повышается точность поражения в 4-10 раз и снижается расход боеприпасов в 5-25 раз;
- 2) снижается потеря самолетов-носителей и повторных заходов на цель (в 2-20 раз) в результате их перехвата средствами ПВО (противовоздушной обороны) противника;
- 3) появляется возможность избирательного поражения целей при сокращении времени на выполнение боевой задачи;
- 4) обеспечивается применение авиации в густонаселенных районах.

Революционные изменения последних лет в технологическом укладе развитых стран мира привели и к революции в военном деле.

Начали использоваться глобальные спутниковые навигационные системы и сетевые системы [6].

С целью обеспечения круглосуточности и всепогодности боевого применения высокоточного оружия была разработана комплексированная инерциально-спутниковая система наведения (СН). На сегодняшний день СН является классическим признаком высокоточного оружия различного типа базирования.

Однако для точного наведения и попадания УАБ или АСП в цель с заданной вероятностью во всех перспективных АСП, в том числе и УАБ, используются головки самонаведения (ГСН) – лазерные, телевизионные, тепловизионные, радиолокационные и другие.

Отдельно следует указать, что наблюдается значительный рост применения средств радиоэлектронной борьбы, позволяющих «ослепить» ГСН и внести ошибки в приемник спутниковой навигационной информации. В целях селекции полезных сигналов на фоне помеховых стали применяться такие меры усложнения сигналов как: внутриимпульсная модуляция, перестройка несущей частоты в т.ч. от импульса к импульсу, кодовые последовательности по периоду следования и другие. Это в свою очередь обусловило усложнение радиоэлектронных блоков ГСН и приемников спутниковой навигационной информации, а также потребовало больших вычислительных ресурсов, что привело к усложнению бортовых цифровых вычислительных машин. Таким образом, описанные выше причины требуют увеличения количества и качества применяемой ЭКБ.

Развитие российского ВТО соответствует мировым трендам, которые учитывают инновации и новейшие разработки науки и техники.

При разработке ВТО в силу того, что приходится использовать последние достижения науки и техники, в том числе микроэлектроники (которая в условиях общемирового тренда цифровизации всех ключевых процессов жизни общества становится критическим фактором обеспечения национального суверенитета) и радиоэлектроники возникает проблема импортозамещения.

При проектировании и создании ВТО основные усилия в настоящее время

направлены на повышение эффективности боевых частей, совершенствование компоновочных схем, использовании конструкционных композиционных материалов и уменьшения массогабаритных характеристик бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Руководством нашей страны поставлена задача оборонно-промышленному комплексу и Министерству обороны Российской Федерации определить перспективные направления развития образцов вооружения и военной техники до 2040 года и оснастить Вооруженные Силы России новейшими образцами вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) до 2020 года. Исследования в данной сфере сводятся к частным техническим решениям, которые повышают эффективность существующих образцов ВВСТ, однако не решают всецело актуальные вопросы опережающего развития, в том числе возникшие после введения санкций.

Одними из самых важных объектов, которые пострадали от применения санкций, стали отрасли, связанные с разработкой электрорадиоизделий, оборудования и технологий, применяемые в производстве и комплектации продукции ОПК. Однако, так как импортное производственное, радиоизмерительное оборудование и технологии в большинстве своем имели отечественные аналоги или иностранные аналоги из стран, не поддерживающих санкции, то основные усилия государства были направлены на разработку мероприятий направленных на замену материалов и электронной компонентной базы (ЭКБ) импортного производства (ИП).

В рамках данных мероприятий на предприятиях ОПК ведутся работы, предусматривающие следующие основные меры:

- 1) организационные (создание постоянно действующей структуры ответственных лиц и рабочих групп;
- 2) установление номенклатуры электронной компонентной базы и конструкционных материалов импортного производства, подлежащих импортозамещению и ее постоянная актуализация с учетом вновь создаваемых отечественных аналогов;
- 3) определение перечня перспективных ЭКБ и конструкционных материалов ИП, для которых необходимо обеспечить разработку отечественных аналогов;
- 4) организация и контроль опытно-конструкторских работ (ОКР) по разработке отечественных аналогов;
- 5) проведение работ по замене ЭКБ и конструкционных материалов ИП в изделиях;
- 6) прогнозирование и учет затрат на импортозамещение.

Реализация мероприятий по импортозамещению в образцах ВВСТ столкнулась с рядом проблем. Среди них можно выделить отсутствие материалов и электрорадиоизделий (ЭРИ) отечественного производства (ОП) с необходимыми тактико-техническими характеристиками (ТТХ), что приводит к необходимости ускоренного проведения научно-исследовательских опытно-конструкторских работ (НИОКР) по разработке аналогов. В процессе выбора конструктивных решений во многих случаях были применены ЭРИ и конструкционные материалы импортного производства, имеющие отечественные аналоги, что свидетельствует о недостаточной осведомленности конструкторов и слабом контроле экспертных

организаций.

При проведении НИОКР по разработке отечественных аналогов ЭРИ и конструкционных материалов приходится решать вопросы, связанные с отсутствием отечественных технологий, оборудования, средств измерения и контроля, материалов и сырья.

Проведение НИОКР по разработке существующих аналогов ЭРИ и конструкционных материалов приводит к увеличению отставания в области разработки перспективных ЭРИ и конструкционных материалов. В результате растут затраты на проведение работ по модернизации и испытаниям существующей аппаратуры в процессе импортозамещения. Отсутствие выделенных структур на предприятиях ОПК и информации о результатах замены ЭКБ и конструкционных материалов импортного производства на отечественные аналоги не повышают эффективность процесса. Особенно необходимо выделить такие проблемы, как многовариантность подходов к решению текущих задач и отсутствие методик оценки достигнутых результатов и их эффективности.

Учитывая вышеизложенное можно сделать вывод, что в настоящее время существует следующая проблема – «Неэффективность процесса импортозамещения», т.е. организация процесса импортозамещения проходит не так, как планировалось.

Инициаторами применения ЭРИ импортного производства в своих разработках являются, как правило, предприятия – соисполнители, которые разрабатывают составные части по техническим заданиям головного исполнителя ОКР. Зачастую в связи с длительным сроком изготовления отечественной ЭКБ смежные предприятия применяют импортную ЭКБ, чтобы выполнить требования заказчика по срокам. При этом в руководящих документах [3, 4] ответственность соисполнителей за соблюдение условий выбора и применения ЭКБ ИП явно не прописана. Конкретная ответственность за выбор ЭКБ импортного производства, оформление всей документации, связанной с ее применением, в том числе и оплата экспертизы обоснованности и правильности ее применения возложены на головных исполнителей ОКР.

Законодательно оформленной ответственности у предприятий-разработчиков составных частей нет, как нет и действенных рычагов воздействия на решение ими вопросов импортозамещения в ходе ОКР. Как правило, после окончания ОКР применение взамен элементов ЭКБ импортного производства их отечественных аналогов (существующих и разрабатываемых) может потребовать значительных схмотехнических изменений и существенной доработки конструкции, с последующим проведением типовых испытаний на дополнительно изготовленном образце ВВСТ. За счет собственных средств смежные предприятия не заинтересованы проводить эти работы.

Требуется разработать регламент применения ЭРИ импортного производства и законодательно закрепить за разработчиками составных частей соблюдение данного регламента с целью правильности и обоснованности применения ЭКБ импортного производства. Разработать меры по увеличению заинтересованности отечественных предприятий в реализации мероприятий по импортозамещению.

Для решения данной проблемы авторами предлагается дальнейшее импортозамещение элементов ЭКБ импортного производства в изделиях ВВСТ сплани-

ровать с использованием существующих и разрабатываемых функциональных отечественных аналогов, создаваемых в ходе опытно-конструкторских работ, поставленных Минпромторгом России. Указанные мероприятия необходимо проводить в процессе серийного производства в рамках Государственного оборонного заказа.

В ходе формирования плановых документов по импортозамещению со стороны согласующих и утверждающих органов к головным исполнителям ОКР предъявляется требование указать в этих документах конкретные сроки замены примененных ЭРИ ИП отечественными аналогами. При этом не учитывается то, что большинство отечественных аналогов отсутствует или находится в стадии разработки, сроки которой могут переноситься, а результаты не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Согласиться со сроком замены, не имея рычагов для его обеспечения, а также гарантии соответствия разрабатываемого отечественного аналога заданным требованиям – риск для головного исполнителя ОКР с высокой степенью вероятности не выполнить мероприятия по импортозамещению и понести соответствующее наказание.

Отечественные аналоги, как правило, функциональные. По этой причине они имеют значительные отличия от их зарубежных прототипов по качеству изготовления, техническим параметрам, массогабаритным характеристикам. Кроме того, их стоимость зачастую значительно превышает стоимость зарубежных прототипов (рис. 2, табл. 1, 2).

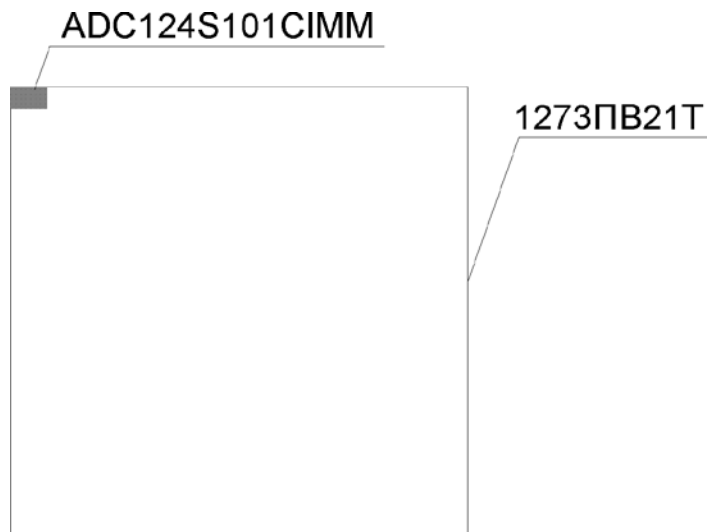


Рисунок 2 – Сравнение площадей, занимаемых на печатной плате ЭРИ ИП и его аналогом

Анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2, показывает, что отечественный аналог уступает ЭРИ ИП по дифференциальной и интегральной нелинейности, что не позволяет применить его в изделии. Кроме того, отечественное ЭРИ уступает по габаритным размерам.

Все это ведет к необходимости вложения значительных финансовых средств, соизмеримых по объему с затратами на проведение новых ОКР по созда-

нию изделий электронной техники на основе отечественной элементной базы.

Таблица 1 – Сравнение отечественных производителей типономинала ЭРИ ИП и иностранного

Критерии выбора	Texas Instruments	Прочие производители
Наличие применения типономиналов ЭРИ указанного производителя в аналогичных образцах ВВСТ	+	–
Наличие опыта поставок типономиналов ЭРИ ИП	+	–

Таблица 2 – Сравнительные технические характеристики типономинала ЭРИ ИП и отечественного аналога

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра		
	Примененное ЭРИ ИП	Аналога из Перечня ЭКБ-2016	Необходимого для образца ВВСТ по ТЗ
	ADC124S101C1MM	1273ПВ21Т АЕНВ.431320.156ТУ	
Количество каналов	4	8	4
Разрешение, бит	12	12	12, не менее
Частота дискретизации, МВьб/с	0,5 ... 1	65	0,5, не менее
Напряжение питания, В	2,7 ... 5,25	1,8 ± 5 %	3,3
Дифференциальная нелинейность, ЕМР	–0,6 ... +0,9	–1,8 ... +1,8	–1,0 ... +1,5
Интегральная нелинейность, ЕМР	±0,64	–3 ... +3	±1,0, не более
Отношение сигнал-шум, дБ	72,4	-	65, не менее
Тип корпуса	VSSOP-10	4233.112-A	-
Размеры корпуса, мм	5,05 × 3,1	63,5 × 63,5	15 × 15
Диапазон рабочих температур, °С	–40 ... +85	–60 ... +125	–40 ... +50

Источник финансирования этих работ до настоящего времени не определен. Кардинально вопрос финансирования замены ЭРИ ИП отечественными аналогами должен быть решен путем внесения этого направления работ либо в государственную программу вооружения, либо в программу развития ОПК. Следует рассмотреть вариант, когда при постановке ОКР на изготовление ЭРИ в цену работы включаются затраты на внедрение результатов ОКР в образцы ВВСТ.

Сложившаяся практика, когда ФГУП «МНИИРИП», Минпромторг России, Министерство обороны и др. за предоставлением информации о необходимости разработки ЭРИ обращаются к головному исполнителю, не эффективна. Инициаторами применения ЭКБ в своих разработках, основными потребителями, и как следствие, основными законодателями в части предъявления требований к ЭКБ являются предприятия – соисполнители – разработчики составных частей финальной продукции. Данные предприятия обладают кадровым и научным потенциалом для анализа текущего положения дел и предложений к совершенствованию ЭКБ по направлениям. В свою очередь головные разработчики обеспечи-

вают рассылку запросов, сбор, обобщение получаемой от смежников информации, что приводит к задержке выдачи ответов в вышестоящие организации. Таким образом, головной исполнитель выполняет роль посредника, зачастую, не имея на своей базе квалифицированных специалистов по всей номенклатуре ЭКБ, что может привести к искажению или предоставлению неправильно обобщенной (переработанной) информации.

Для повышения эффективности работы целесообразно разделить функции между головным исполнителем ОКР и соисполнителями в части согласования применения ЭРИ импортного производства, организации разработки отечественных аналогов ЭКБ и порядка замены ЭРИ ИП.

К вопросу замены ЭРИ импортного производства должен быть рациональный подход, заключающийся в том, что в новых разработках необходимо в первую очередь ориентироваться на использование отечественной элементной базы, а в завершающихся разработках и для серийной продукции решать вопросы импортозамещения только в ходе проведения работ по модернизации, обеспечивая до тех пор бесперебойность поставок накопленными страховыми запасами.

Для подавляющего большинства серийно выпускаемой финальной продукции в условиях, когда элементная база иностранного производства приобретается беспрепятственно, замена ЭРИ ИП отечественными аналогами в большинстве случаев экономически нецелесообразна.

Если требуется в обязательном порядке в определенные сроки провести работу по переводу элементной базы на отечественную комплектацию, это мероприятие с достаточным объемом финансирования должно быть включено в план-график импортозамещения с одновременным включением в одну из программ (ГПВ или ГП развития ОПК).

При отсутствии финансирования работ по замене ЭРИ ИП не требовать безоговорочного выполнения дорожных карт, определяющих сроки выполнения замены.

Необходимо, чтобы эти положения были отражены в основных положениях государственной политики в области импортозамещения ЭРИ импортного производства.

Целесообразно сформировать государственную политику в области разработки отечественной электронной компонентной базы, технологий и оборудования для обеспечения их производства. Одновременное решение вопросов импортозамещения ЭРИ ИП во всех сферах производства продукции военного назначения приведет к распылению вложения финансовых средств и не решению вопроса в целом. Необходимо в рамках указанной политики определиться с приоритетными направлениями реализации этого процесса, в качестве которых могут быть выделены ракетостроение и космос, то есть отрасли, в которых наиболее критичными являются такие параметры комплектующих изделий, как информационная безопасность, массогабаритные характеристики и надежность.

Результаты импортозамещения в этих отраслях могли бы стать основой для последующего массового их распространения в других отраслях, где габариты и масса не оказывают решающего влияния на технические характеристики продукции (автомобильный, железнодорожный, морской транспорт и т.д.), которая до тех пор может комплектоваться существующей отечественной ЭКБ и ранее при-

мененной ЭКБ ИП.

В связи с тем, что приказом Министра обороны РФ № 681 от 09.11.2017 г. [1] Инструкция по контролю Министерством обороны Российской Федерации применения ЭКБ ИП в системах, комплексах и образцах ВТ [2] прекратила свое действие, а действующее в настоящее время «Положение о порядке применения ЭКБ ИП в обеспечение разработки, модернизации и производства образцов вооружения, военной и специальной техники» РЭК 05.002-2015 не регламентирует порядок применения ЭКБ иностранного производства при изготовлении и поставках образцов ВВСТ экспортного исполнения, необходимо определить порядок применения ЭКБ импортного производства при изготовлении и поставках образцов ВВСТ экспортного исполнения.

Таблица 3 – Результаты SWOT-анализа эффективности мероприятий импортозамещения при создании отечественной ЭКБ для авиационной техники

Предприятие	Strenghts (сильные стороны) «S»	Opportunities (возможности) «O»	Внешний мир
	<ul style="list-style-type: none"> -административные и финансовые ресурсы; -продукция с уникальными характеристиками; -высокий производственный и интеллектуальный потенциал; -квалифицированные кадры; -опыт создания наукоемкой продукции ответственного применения; -поддержка загрузки предприятий оборонными заказами; -установившиеся кооперационные цепочки; -научно-техническая и материальная база 	<ul style="list-style-type: none"> -реализация научных, производственных заделов; -дополнительные источники дохода за счет гражданских рынков; -упрощение применения отечественной ЭКБ; -импортнезависимость; -снижение стоимости ВВСТ; -повышение конкурентоспособности отечественной РЭА; -создание дополнительных рабочих мест; -поддержка предприятия с помощью Федеральных целевых программ 	
	Weaknesses (слабые стороны) «W»	Threats (угрозы) «T»	
	<ul style="list-style-type: none"> -отсутствуют единые базы САПР ЭКБ ОП; -слабая информированность о ЭКБ ОП; -дефицит квалифицированных кадров; -недостаточные мощности для проектирования и разработки; -поставки контрафактных компонентов; -бюрократизм при взаимодействии госорганов с представителями промышленности; -большие накладные расходы 	<ul style="list-style-type: none"> -снижение объемов ГОЗ; -отставание технологического уровня; -кадровые потери в количественном и качественном отношениях; -снижение уровня конкуренции; -санкции в отношении предприятий ОПК; -потеря технологической независимости; -кризис мировой экономики 	

Для проведения анализа всех ситуаций, возможностей, рисков и угроз авторами был проведен SWOT–анализ эффективности мероприятий импортозаме-

щения (табл. 3) [5]. SWOT–анализ был выбран авторами потому, что он позволяет оценить внутренние и внешние факторы, которые влияют на развитие проекта. Этот метод помогает оценить сильные и слабые стороны, найти новые возможности и определить возможные угрозы. То есть такой анализ – эффективный способ исследования данной проблемы и поиска путей решений.

Комплекс маркетинговых стратегий:

Итоговая таблица была составлена по алгоритму анализа пар S-O, S-T, W-O, W-T (табл. 4).

Таблица 4 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	Возможности	Угрозы
Сильные стороны	Благоприятные обстоятельства S/O	Возможная реакция S/T
Слабые стороны	Необходимые мероприятия W/O	Требует действия W/T

Благоприятные обстоятельства S/O

Российская Федерация располагает достаточной ресурсно–сырьевой базой и научно–технологическим потенциалом для производства данной продукции.

Предприятия промышленности сумели за последние несколько лет мобилизоваться, стали искать новые рынки сбыта продукции, альтернативных поставщиков и другие источники финансирования. Минпромторг России направил максимум усилий на поддержку проблемных отраслей.

Приоритетом импортозамещения в России является ОПК, т.к. обороноспособность и экономическая безопасность государства в критический момент не должна зависеть от иностранных поставок комплектующих, которые используются при создании авиационной и космической техники.

Программа импортозамещения в Российской Федерации набирает новые обороты. По плану к 2020 году зависимость российской экономики от зарубежных поставок сократится на порядок. Импортозамещение в России – это развитие высокотехнологичных производств в своей стране. Производить свое, а не покупать чужое – девиз импортозамещения.

Необходимые мероприятия W/O:

- 1) субсидирование инновационных проектов, направленных на разработку продукции ОПК;
- 2) финансирование наукоемких проектов для военной и гражданской продукции широкого потребления.
- 3) привлечение инвестиций в инновации и создание нового производства, новых видов продукции, формирование благоприятного инвестиционного климата, обеспечение выпуска конкурентоспособных на отечественном и зарубежном рынках изделий;
- 4) создание бизнес–инкубаторов в каждом субъекте Российской Федерации с упрощенной системой экономической отчетности для наукоемких предприятий;
- 5) проведение фундаментальных исследований для освоения «рынков будущего»;

- б) интеграция коммерческих компаний в радиоэлектронную промышленность;
- 7) развитие сети дизайн-центров;
- 8) развитие международной научно – производственной кооперации;
- 9) диверсификация продукции организаций ОПК.

Возможная реакция S/T:

Повышение импортнезависимости, обороноспособности и конкурентоспособности российской продукции за счет стимулирования технологической модернизации производства. Повышение уровня экономической безопасности государства. Значительный рост научно-технической отрасли. Сохранение уровня поступления валютной выручки с одновременным ростом валютных резервов и улучшения торгово-экономического баланса государства.

Требуется действия W/T:

- 1) повышение технологического уровня производства ЭРИ отечественного производства;
- 2) привлечение и закрепление молодых специалистов на предприятиях ОПК. Повышение престижа технических специальностей. Запуск программ подготовки и переподготовки специалистов с Минобрнауки России и корпоративными образовательными центрами ведущих предприятий;
- 3) производство конкурентоспособной продукции;
- 4) развитие новых собственных технологий, ЭРИ, процессов;
- 5) создание единых баз САПР ЭКБ ОП;
- 6) информирование о состоянии импортозамещения и доведение до разработчиков необходимой информации;
- 7) создавать индустриальные парки (специально организованные для размещения новых производств территории, обеспеченные энергоносителями, инфраструктурой, необходимыми административно-правовыми условиями, управляемые специализированными компаниями);
- 8) желательно не просто замещать, важно разрабатывать новые образцы. Делать не много, а делать лучше и качественнее;
- 9) поддерживать на различных уровнях «стартапы» и научно-производственные лаборатории.

Соотношение сильных и слабых сторон можно изменить в ближайшей перспективе в лучшую для предприятий ОПК сторону, оценка возможностей показала, что оборонно-промышленный комплекс Российской Федерации обладает высоким потенциалом, реализация которого позволит нейтрализовать большинство угроз.

Необходимо отказаться от идеи «догнать и перегнать» возможного противника, оценивать угрозы для безопасности страны с перспективой до 30 лет, готовить оружие не завтрашнего и даже не послезавтрашнего дня, а на историческую неделю вперед.

Для достижения поставленной цели необходимо использовать стратегию специализации, которая опирается на дифференциацию и на лидерство по издержкам в рамках целевого сегмента.

Литература

1. Приказ Министра обороны РФ № 681 от 09.11.2017 г.
2. «Инструкция по контролю Министерством обороны РФ применения ЭКБ иностранного производства в системах, комплексах и образцах ВТ» утверждена Решением ВПК при Правительстве РФ.
3. Инструкция о порядке применения сырья и материалов иностранного производства в системах, комплексах и образцах военной техники. Одобрена Коллегией ВПК РФ 23.12.2015 г.
4. РЭК 05.002-2015 – Положение о порядке применения электронной компонентной базы иностранного производства в обеспечение разработки, модернизации и производства образцов вооружения, военной и специальной техники. Основные положения. Разработано ФГУП «МНИИРИП», утверждено Минпромторгом России.
5. Планирование отношений с потребителями. Кн. 7: Учеб. пособие / Адапт. пер. с англ.; ред. А.Г. Теслинов // Жуковский: МИМ ЛИНК, 2013. 64 с.: рис. – (R656 «Практический маркетинг»).
6. Проблемы создания корректируемых и управляемых авиационных бомб / Под ред. Е.С. Шахиджанова // М.: Инженер, 2003. 528с., илл. [Электронный ресурс] (дата обращения 15.09.2019 г.).

УДК 621.391.01

Методы математического моделирования негауссовских случайных величин и процессов

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационные технологии
и управляющие системы,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования,

Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Рассмотрены математические методы, позволяющие моделировать негауссовские случайные величины и процессы. Проанализированы модели и описание негауссовских коррелированных процессов в виде порождаемых гауссовским шумом, а также методы формирования стационарных случайных процессов, заданных одномерной плотностью распределения вероятностей и функцией автокорреляции. Приведены примеры формирования негауссовских случайных величин и процессов.

Математическое моделирование, случайные величины, негауссовские процессы, функция автокорреляции, дискретные величины.

Methods of mathematical modeling of non-Gaussian random variables quantities and processes

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
head of the Department of information technologies and control systems,
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor,
head of the Department «Information and electronic service»,
State budgetary educational institution of higher education

Volga region state University of service, Tolyatti

Mathematical methods allowing to model non-Gaussian random variables and processes are considered. The models and description of non-Gaussian correlated processes in the form of generated Gaussian noise are analyzed, as well as the methods of formation of stationary random processes defined by the one-dimensional density distribution of Verovabilities and the autocorrelation function. Examples of formation of non-Gaussian random variables and processes are given.

Mathematical modeling, random variables, non-Gaussian processes, autocorrelation function, discrete quantities.

Введение. Методам формирования и моделирования случайных величин (СВ) и процессов с заданной плотностью распределения вероятностей (ПРВ) посвящено много научных публикаций [1-3]. Для получения реализации случайных величин используются независимые стандартные СВ с равномерным распределением на отрезке $[0, 1]$

$$\gamma \sim \text{Rav}[a, b], \quad a = 0, b = 1,$$

и гауссовские независимые СВ

$$\xi \sim N(m, \sigma^2),$$

где m, σ^2 – соответственно, математическое ожидание и дисперсия.

Здесь Rav – математический знак равномерного распределения случайной величины на заданном отрезке.

Для моделирования случайных величин применяются методы нелинейного преобразования, суперпозиции, кусочной аппроксимации, Неймана и многие другие.

Рассмотрим и проанализируем наиболее распространенные методы.

Метод нелинейного преобразования случайных величин. Он основан на определении ПРВ СВ $\xi = \psi(\eta)$, полученной от нелинейного преобразования СВ η .

Преобразование $\psi(x)$ считается гладким, монотонно возрастающим $\psi'(x) > 0$, где (\prime) – математический знак производной по времени, если у него существует обратное преобразование, так что $x = \psi'(y)$.

Так как для функций распределение СВ ξ и η справедливо равенство

$$F_{\xi}(x) = F_{\eta}[\psi^{-1}(x)], \tag{1}$$

то продифференцировав, получим

$$W_{\xi}(x) = W_{\eta}[\psi^{-1}(x)] \frac{d\psi^{-1}(x)}{dx}.$$

Положив в выражении (1)

$$\psi(x) = F_{\eta}(x),$$

получаем

$$F_{\xi}(x) = x.$$

То есть случайная величина ξ имеет равномерное распределение.

В результате, если случайную величину η преобразовать нелинейным преобразованием, равным ее функции распределения, то получим на интервале $[0, 1]$ равномерно распределенную СВ.

Если в выражении (1) положить

$$\psi(x) = F^{-1}(x),$$

где $F(x)$ – заданная функция распределения, а

$$\eta \in \text{Rav}[0, 1], F_{\eta}(x) = x,$$

то получим, что СВ ξ имеет заданное распределение

$$F_{\xi}(x) = [F^{-1}(x)]^{-1} = F(x).$$

Это правило лежит в основе метода формирования СВ имеющую заданную функцию распределения.

Заметим, что в этом случае необходимо сделать нелинейное преобразование $\xi = F^{-1}(\gamma)$, означающее решение уравнения в виде

$$F(\xi) = \gamma, \gamma \in \text{Rav}[0, 1].$$

Рассмотрим пример. Пусть требуется сформировать случайную величину с ПРВ

$$W(x) = \begin{cases} \frac{x}{a\sqrt{a^2-x^2}}, & x \in [0, a); \\ 0, & x \notin [0, a). \end{cases}$$

Интегрируя $W(x)$, получим выражение для функции распределения

$$F(x) = \frac{1}{a} \int_0^x \frac{t}{\sqrt{a^2-t^2}} dt = 1 - \frac{1}{a} \sqrt{a^2 - x^2}.$$

Отсюда получаем уравнение

$$1 - \sqrt{\frac{a^2-x^2}{a^2}} = \gamma_1, \gamma_1 \in \text{Rav}[0, 1],$$

из которого следует моделирующий алгоритм

$$\xi = a\sqrt{1 - \gamma^2},$$

где $\gamma = 1 - \gamma_1$.

Широкое распространение получил метод суперпозиций, который применяется для формирования случайных величин с ПРВ вида

$$W(\xi) = \sum_{i=1}^n p_i W_i(\xi), p_i > 0, \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (2)$$

Он производится за два шага.

На первом шаге осуществляется реализация дискретной СВ, принимающей с вероятностями p_k значения $\bar{1}, n$. Здесь прямая черта сверху означает усреднение по множеству.

На втором шаге, после получения значения k формируется величина с ПРВ $W_k(\xi)$, значение которой и принимается в качестве ξ .

Модели (2) называются смесями ПРВ $W_1(\xi), \dots, W_n(\xi)$.

Рассмотрим пример формирования случайной величины, имеющей ПРВ

$$W(\xi) = \frac{0,5}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left\{-\frac{(\xi+m)^2}{2\sigma^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(\xi-m)^2}{2\sigma^2}\right\} \right],$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной величины.

Как видно, $W(\xi)$ представляет собой смесь двух гауссовских ПРВ с равными дисперсиями σ^2 , средними $\pm m$ и весовыми коэффициентами $p_1 = p_2 = 0,5$.

В соответствии с методами суперпозиции алгоритм формирования случайной величины имеет вид

$$\xi = \sigma_x + \gamma_m,$$

где $x \in N(0, 1)$, а γ_m принимает равновероятно два значения $\pm m$.

Модели и описание негауссовских коррелированных процессов в виде порождаемых гауссовским шумом. Как правило, для негауссовских процессов известны одномерная ПРВ и функция корреляции. При такой априорной информации негауссовский процесс $n(t)$ удобно представить как результат комбинированного преобразования, имеющего линейный и нелинейный характер, белого гауссовского шума:

$$n(t_k) = F\{\sum_{l=1}^n A_{kl} \xi_l\}, \quad (3)$$

что соответствует схеме, представленной на рисунке 1, где ЛФ – линейный фильтр; БНП – блок нелинейного (безынерционного) преобразования.

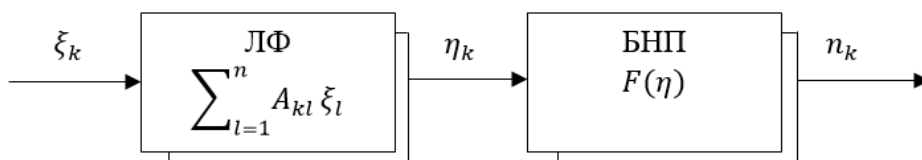


Рисунок 1 – Структурная схема комбинированного преобразования белого гауссовского шума

Линейный фильтр соответствует преобразованию

$$\eta_k = \sum_{l=1}^n A_{kl} \xi_l,$$

в котором

$$\langle \eta \rangle = 0; \langle \eta^2 \rangle = 1; \langle \eta_k \eta_l \rangle = B_{0\eta}(|k - l|).$$

Нелинейный элемент соответствует БНП с характеристикой $F(\eta)$, обратная функция которой $Q(\xi)$ является однозначной, причем

$$\frac{dQ(\xi)}{d\xi} > 0.$$

При заданных $W_n(n)$ и $B_n(\tau)$ характеристики оператора выражения (3) находятся в следующей последовательности:

1. По заданной ПРВ определяют $F(\eta)$ из нелинейного дифференциального уравнения

$$W_{\eta,1}(\eta) = W_{n,1}[F(\eta)] \frac{dF(\eta)}{d\eta},$$

где

$$W_{\eta,1}(\eta) = N(0, 1); F(0) = 0; \frac{dF(\eta)}{d\eta} > 0.$$

2. По заданной корреляционной функции $B_n(\tau)$ и найденной характеристике БНП $F(\eta)$ вводят функцию $B_{0\eta}$, связанную с $B_n(\tau)$ соотношением

$$B_n(\tau) = \sum_{m=0}^{\infty} C_m^2 \frac{B_{0\eta}^m(\tau)}{m!},$$

где

$$C_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\eta) H_m(\eta) \exp\{-0,5\eta^2\} d\eta;$$

$H_m(\eta)$ – полиномы Эрмита.

Иногда, более точно вычислить $B_{\xi}(\tau)$ удастся прямым методом в замкнутой форме:

$$B_{\xi}(\tau) = \frac{1}{2\pi \sqrt{1-B_{0\eta}^2}} \iint_{-\infty}^{\infty} F(\eta_k) F(\eta_l) \exp\left\{-\frac{\eta_k^2 - 2B_{0\eta} \eta_k \eta_l + \eta_l^2}{2(1-B_{0\eta}^2)}\right\} d\eta_k d\eta_l.$$

Характеристику линейного фильтра, заданного матрицей $\|A_{kl}\|$, можно определить из соотношения

$$B_{0\eta}(|k - l|) = \sum_{m=1}^n \sum_{g=1}^n A_{km} A_{lg} m(\xi_m \xi_g) = \sum_{m=1}^n A_{km} A_{lm}.$$

Удобство подобного описания состоит в следующем.

Поскольку $\{n\}$ является продуктом нелинейного и монотонного преобразования последовательности $\{\eta\}$, то распределение W_{nh} связано с гауссовской ПРВ $W_{\eta h}$ соотношением

$$W_n(n_1, \dots, n_h) = W_\eta(\eta_1, \dots, \eta_h) \prod_{k=1}^h \frac{dQ(n_k)}{dn_k}.$$

Пусть для ПРВ $W_{\eta h}$ справедливо разложение

$$W_{\eta h}(\eta_1, \dots, \eta_h) = W_\eta(\eta_1), \dots, W_\eta(\eta_p | \eta_{p-1}, \dots, \eta_1) \times \prod_{k=p+1}^h W_\eta(\eta_k | \eta_{k-1}, \dots, \eta_{k-p}).$$

Тогда в результате монотонных безынерционных преобразований можно получить аналогичное разложение

$$W_{nh}(n_1, \dots, n_h) = W_n(n_1), \dots, W_n(n_p | n_{p-1}, \dots, n_1) \times \prod_{k=p+1}^h W_n(n_k | n_{k-1}, \dots, n_{k-p}),$$

где

$$W_n(n_k | n_{k-1}, \dots, n_{k-p}) = W_\eta(\eta_k | \eta_{k-1}, \dots, \eta_{k-p}) \frac{d\eta_k}{dn_k};$$

$$W_n(n_1) = W_\eta(\eta_1) \frac{d\eta_1}{dn_1}.$$

То есть монотонное безынерционное преобразование не изменяет порядка преобразуемого марковского процесса.

Формирование стационарных случайных процессов, заданных одномерными ПРВ и функцией автокорреляции. Универсальным способом формирования, и как правило более простым, является последовательное применение к нормальному СВ преобразования, имеющего линейный инерционный и нелинейный безынерционный характер [4].

Первое дает возможность получить нормальный случайный процесс с функцией корреляции, определяемой параметрами преобразования, второе – изменяет распределение вероятности.

Оба эти преобразования в дискретном виде можно записать как:

$$y_h = \sum_{i=1}^m b_i y_{h-i} + \sum_{i=0}^n a_i x_{h-i}, \quad x_i \in N(0, 1); \quad (4)$$

$$z_h = f(y_h). \quad (5)$$

Случайный процесс $z(t)$ будет иметь ПРВ $W(z)$, которая определяется преобразованием f , и автокорреляционную функцию $B_z(\tau)$, которая определяется величинами m, n, b_i, a_i .

Подготовительная работа связана с решением обратной задачи: по заданным $W(z)$ и $B_z(\tau)$ определить f, m, n, b_i, a_i .

Как правило, строят полиномиальную аппроксимацию нелинейного преобразования выражения (5) по ПРВ $W(z)$ и ее параметрам. В основное алгоритма работы модуля лежит равенство

$$F(z) = \Phi(y),$$

где $F(z)$ – интегральная функция распределения случайного процесса, $z = f(y)$; $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\{-0,5t^2\} dt$.

Для решения задачи бесконечный интервал изменения значений $y(t)$ ограничивают пределами $\pm y_0$, так что $y(t) \in (-y_0, y_0)$. В этом интервале выбирают k точек y_k для каждой из которых решают уравнение

$$F(z_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_k} \exp\{-0,5t^2\} dt, \quad (6)$$

относительно z_k . Решение находится методом деления отрезка пополам с заданной точностью. Вычисление $F(z)$ по ПРВ $W(z)$ выполняют либо используя известные выражения, либо численным интегрированием.

Если $W(z)$ является эмпирической ПРВ и задана гистограмма, то в выражении (6) используется аппроксимация $W(z)$ имеющая кусочно-линейный характер.

По критерию минимума СКО, с заданной точностью, на основе результатов решения (6), строят полином аппроксимирующий нелинейное преобразование $f(y)$

$$z = f(y) \approx \sum_{i=0}^L d_i y^i. \quad (7)$$

Результатом работы модуля является степень полинома L и коэффициенты d_i .

Проведем вычисление корреляционной функции $B_y(\tau)$ процесса $y(t)$ по корреляционной функции $B_z(\tau)$ процесса $z(t)$ и рассчитанному нелинейному преобразованию (7). Корреляционная функция $B_z(\tau)$ задается в дискретных точках $\tau_h = h\Delta\tau; h = \overline{1, N}$.

Если процесс $y(t)$ с $B_y(\tau)$ преобразуется в соответствии с выражением (7), то зависимость может быть выражена в виде

$$B_z(\tau) = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \frac{B_y^m(\tau)}{m!}, \quad (8)$$

где

$$C_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) H_m(x) \exp\{-0,5x^2\} dx. \quad (9)$$

Здесь $H_m(\cdot)$ – полином Эрмита.

Для вычисления C_m выражение (9) преобразуется с учетом (7) к виду:

$$C_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\sum_{i=0}^L d_i x^i) H_m(x) \exp\{-0,5x^2\} dx.$$

После подстановки выражений для $H_m(x)$ приходим к вычислению интегралов:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^k \exp\{-0,5x^2\} dx = \begin{cases} (k-1)!! & \text{при } k - \text{четные,} \\ 0 & \text{при } k - \text{нечетные.} \end{cases}$$

Вычисление C_m проводят последовательно для $m = 0, 1 \dots$. Рассмотрим вычисление коэффициентов C_m .

Пусть $m_y = 0$ и $\sigma_y^2 = 1$, а процесс $z(t)$ в общем случае имеет характеристики $m_z \neq 0$ и $\sigma_z^2 \neq 1$.

Тогда из выражения (8) следует, что

$$\sigma_z^2 + m_z^2 = \sum_{m=0}^{\infty} C_m^2 \frac{1}{m!}.$$

Вычисления C_m прекращают, когда выполнено условие

$$\left| \sigma_z^2 + m_z^2 - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^2}{k!} \right| < \varepsilon,$$

где ε – заданная погрешность вычислений.

По известным коэффициентам C_k и значениям корреляционной функции B_{zh} определяются значения B_{yh} из уравнения

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^2}{k!} B_{yh}^k - m_z^2 - \sigma_z^2 B_{zh} = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) является не чем иным, как многочлен степени k относительно B_{yh} . Его решением является действительный корень многочлена, находящийся в диапазоне $(-1, 1)$.

Найдем коэффициенты выражения (4), преобразующего случайные величины ξ_i с $m_\xi = 0$, $\sigma_\xi^2 = 1$ и $B_\xi(\tau) = \delta(\tau)$ в нормальный случайный процесс $y(t)$ с $m_y = 0$, $\sigma_y^2 = 1$ и $B_y(\tau)$.

Чтобы упростить расчеты в выражении (4), положим $\eta = 0$, тогда (4) запишется в виде

$$y_n = \sum_{i=1}^m b_i y_{n-i} + a \xi_n.$$

Исходными данными для вычисления a, m, b_i ($i = 1$) являются значения корреляционной функции $k_j = B_y(j\Delta\tau)$, $j = \overline{0, N-1}$, и СКО аппроксимации.

Задача определения m, a, b_i решается в виде минимизации функционала

$$F = F(\vec{K} - \vec{B}),$$

где \vec{K} – вектор значений заданной функции; \vec{B} – вектор значений полученной автокорреляционной функции.

Если найдены такие m, a, b_i при которых СКО между заданной и расчетной корреляционными функциями не превышает заданного значения, то решение считается найденным.

Выводы. Таким образом, рассмотрены вопросы, связанные с методами математического моделирования негауссовских случайных величин и процессов. Рассмотрены модели и методы описание негауссовских коррелированных процессов в виде порождаемых гауссовским шумом. Проанализировано формирование стационарных случайных процессов, заданных одномерными плотностью распределением вероятностей и функцией автокорреляции. Приведены конкретные примеры формирования негауссовских случайных процессов.

Литература

1. Поляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М: Сов. радио, 1971. 400 с.
2. Расщепляев Ю.С., Фандиенко В.Н. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления. М.: Энергия, 1984. 144 с.
3. Четверкина С.И., Шульман В.Б. Пакет прикладных программ моделирования случайных воздействий в задачах радиосвязи. Новосибирск: АН СССР. Сиб. Отд-ние. ВЦ, 1983. 31 с.
4. Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. Л.: Машиностроение, 1986. 320 с.

УДК 629.7

Технические средства увеличения эффективности администрирования волоконно-оптических коммуникаций с помощью LC-разъема

А.Б. Семенов, доктор технических наук, профессор,
НИУ Московский государственный строительный университет, МГСУ, Москва,
Т.С. Аббасова, кандидат технических наук, доцент,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Проанализированы возможности широко распространённого LC-разъема по его использованию в качестве компонента администрирования информационной проводки; показано, что применение этого соединителя позволяет заметно нарастить эффективность администрирования оптической кабельной системы относительно требований базовых стандартов с полным выполнением их требований; приведены примеры конкретных решений различного уровня по реализации системы администрирования.

Оптические кабельные системы, коммутационное оборудование, средства администрирования.

Technical means of increasing the efficiency of administering fiber-optic communications using the LC connector

A.B. Semenov, Doctor of Engineering Science, professor,
Moscow State University of Civil Engineering, MGSU, Moscow,
T.S. Abbasova, Ph.D., assistant professor,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

Analyzed the capabilities of the widespread LC-connector for its use as a component of information wiring administration; it is shown that the use of this connector allows to significantly increase the efficiency of administration of the optical cable system with respect to the requirements of basic standards with full compliance with their requirements; Examples of specific solutions of various levels for the implementation of the administration system are given.

Optical cable systems, optical connectivity, administration tools.

Введение

Базовый уровень администрирования структурированных кабельных систем (СКС) и оптической подсистемы как их части, задаваемый профильными стандартами как TIA-606B и ISO/IEC 14763-1, не в полной мере соответствует потребностям практики. Содержащиеся в них подходы не обеспечивают необходимый уровень защиты от непреднамеренных ошибок в процессе изменения кон-

фигурации информационно-телекоммуникационных систем (ИТС) на физическом уровне; а также не могут 100-процентно гарантировать отражение реально выполненных изменений в базе данных (БД), которая в результате быстро теряет свою актуальность.

Для устранения отмеченных недостатков разработан и внедрен в широкую инженерную практику ряд технических средств, в ряде случаев, образующих полноценную многоуровневую систему [1...3]. При ее создании актуально использование таких типов соединителей, которые не только отвечают существующим и перспективным требованиям, обеспечивают удобство коммутации, но и гарантируют отсутствие какого-либо взаимодействия вновь вводимых элементов с цепями передачи сигналов.

Оптический разъем LC – общие свойства

Оптические тракты передачи формируются с обязательным использованием разъемных оптических соединителей, в основе которых лежит армирующий волоконный световод центрирующий наконечник. Решения без наконечника, применяемые преимущественно с целью удешевления готового серийного продукта (доля наконечника в отпускной цене готового компонента нередко достигает 40%) встречается буквально в единичных случаях (VF-45 американской компании 3M, Optoclip II швейцарской компании Huber & Suhner).

LC-разъем (от англ. Link Control) стал одним из первых оптических соединителей, которые относятся к группе малогабаритных или SFF-изделий. Его применение на уровне пользовательского интерфейса физического уровня (информационная проводка и активное сетевое оборудование) фиксируется профильными стандартами. Распространение единства типа соединителя на всю кабельную систему и активное сетевое оборудование стандартами не требуется, но считается обязательным из соображений удобства проектирования, построения и последующей эксплуатации информационной проводки.

Главное преимущество оптического разъема LC как основного типа оптического соединителя СКС в случае дуплексного построения трактов – возможность по меньшей мере вдвое нарастить плотность компоновки коммутационного оборудования по сравнению с SC, ST и иными соединителями предыдущих поколений.

Особенности администрирования кабельной системы

Действие системы администрирования распространяется на все составляющие физического уровня ИТС. Ее центральный компонент – БД, которая описывает саму ИТС и ряд непосредственно или косвенным образом связанных с ней компонентов.

Для расширения функциональных возможностей системы администрирования БД по заранее заданным правилам взаимодействует с определенным набором дополнительных внешних документов. Степень полноты отражения образа ИТС в немалой степени определяется принятым уровнем администрирования [4].

Отсутствие штатного встроенного или навесного источника питания на физическом уровне ИТС обеспечивает ему высочайшую эксплуатационную надежность. Обратная сторона этого принципа – невозможность прямого привлечения для его обслуживания средств электронной обработки данных. Немногочисленные исключения из этого правила в виде роботизированных кроссов встре-

чаются буквально в единичных случаях даже на уровне предложений, не говоря уже о реальных внедрениях.

Необходимость ручного изменения конфигурации физического уровня ИТС сопряжена с рисками, определяемыми человеческим фактором. Известен ряд предложений по устранению этого недостатка. Всю их совокупность можно разделить на чисто механические компоненты и решения, в той или иной форме требующие источника питания. Вне зависимости от исполнения предлагаемого устройства или их комплекса обеспечено выполнение фундаментального положения базовых стандартов структурированных кабельных систем (СКС) в части отсутствия какого-либо взаимодействия вновь вводимых элементов с цепями передачи сигналов.

Технические средства могут быть полностью или частично механически независимы от компонентов физического уровня или же использовать их как несущую платформу по постоянной или временной схеме. Примеры такой связи: применение корпусов различной цветовой гаммы, установка дополнительных компонентов на свободные места корпусов вилок и/или розеток, использование внутренних пустот кабельных изделий и коммутационных элементов для монтажа чипов RFID, прокладки дополнительных цепей и т.д.

Простейшие средства администрирования

Простейшие средства поддержки администрирования – цветовое кодирование и символьная маркировка. Несмотря на свою техническую простоту, эти компоненты обеспечивают достаточно высокую результирующую эффективность.

Корпус вилок LC выполнен из пластмассы, большинство моделей снабжается полимерным хвостовиком, ограничивающим снизу радиус изгиба волокна. Пластик легко окрашивается в различные цвета, что может быть задействовано в интересах системы администрирования. Наличие нескольких элементов различного цвета значительно увеличивает информативность маркировки. Отдельные варианты такой маркировки с использованием окраски в различные цвета вилок и хвостовиков представлены на Рисунке 1 [2].

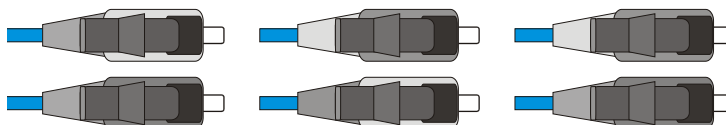


Рисунок 1 – Цветовая маркировка вилок LC

Применение корпусов различного цвета зафиксировано стандартами и используется для указания типа волокна (многомодовое или одномодовое), а также исполнения полировки (обычная или угловая). В нормативных документах предусмотрено также указание полярности дуплексной вилки за счет применения корпусов различных оттенков, но на практике оно не используется.

Цвет хвостовика в части администрирования задействуется как

- эквивалент цвета корпуса отдельных вилок, т.е. как замена или дополнение буквенной маркировки;

- средство идентификации отдельных разновидностей изделий внутри определенной группы (например, как указание уменьшенных вносимых потерь и аналогичных им свойств).

На практике встречаются нестандартные цвета корпуса. Они привлекаются

- для указания специальных свойств разъема с обычным форм-фактором (например, корпус одномодовых соединителей в случае наличия линзовой системы расширения луча изготавливается из ярко-красной пластмассы);
- как средство визуального задания варианта разъема при применении механической ключевой схемы блокировки.

Фиксированная символьная маркировка прописными буквами А и В введена еще первыми редакциями стандартов и формируется в процессе изготовления компонента. Используется преимущественно как средство указания полярности соединителя и в этом качестве представляет замену «оттеночного» подхода нормативной документации. По символам А и В, можно дополнительно определить вариант дуплексного шнура (прямой или обращенный).

Символьная маркировка условно делится на «боковую» и «верхнюю».

В дуплексных вилках разъемов с переменной полярностью при использовании боковой поверхности корпуса каждая из одиночных вилок как правило содержит двойную маркировку, как показано на Рисунке 2 [2]. Пользователю виден только один из символов, второй закрыт корпусом соседней вилки.

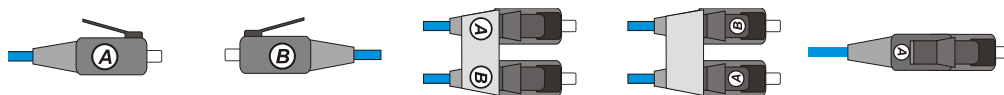


Рисунок 2 – Символьная маркировка вилок LC

Вилка LC обладает довольно большой площадью свободной боковой поверхности корпуса. В тех ситуациях, когда это изделие имеет фиксированную конфигурацию, ее можно задействовать в интересах системы администрирования. Для этого на корпусе вилки пресс-формой или лазерной гравировкой формируются фирменные логотипы, серийные номера (компания Sanwa), величина вносимых потерь и аналогичные им данные.

«Верхняя» маркировка представлена следующими разновидностями.

Традиционно для ее нанесения задействуется защитный козырек, который изначально имеет большую площадь. Кроме того, при подключенной вилке эта часть конструкции остается вне розетки и визуально доступна системному администратору.

Еще одно место для нанесения маркировки – рычаг фиксирующей защелки, передняя часть которого имеет достаточно большую свободную поверхность [5].

Использование для маркировки задней части корпуса вполне возможно из-за ее большой площади, но встречается редко, т.к. она закрывается защитным ко-

зырьком. При его отсутствии маркировка перекрыта свободным концом защелки и неудобна для чтения.

Механическая блокировка

Механическая блокировка представляет собой средство защиты от некорректного подключения; от несанкционированного и/или ошибочного отключения. В последнем случае разъем представляет собой полноправный компонент системы информационной безопасности.

Сравнительная простота реализации решений этой группы обеспечила им широкое распространение на уровне серийных продуктов. Классификация полной совокупности таких компонентов представлена на рисунке 3 [3].



Рисунок 3 – Номенклатура элементов механической блокировки элементов разъема LC

Защита от ошибочного подключения

Относительно толстые стенки гнезда розетки LC позволяют эффективно задействовать ключевую схему кодировки.

Согласно первому варианту ее реализации на боковых гранях корпуса вилки, свободных от рычажной защелки, формируется от одного до трех выступов или вырезов, которые взаимодействуют с ответными компонентами гнезда розетки. Для облегчения визуального контроля выбора правильной вилки подобная механическая блокировка данной разновидности часто дополняется цветовой маркировкой корпуса (до 12 различных цветов в известных серийных продуктах).

Второй вариант основан на дополнительных шайбах некруглой в сечении формой, которые одеваются на установочный элемент центриатора розетки [6]. Та часть гнезда корпуса вилки, в котором располагается центрирующий наконечник, также имеет некруглое сечение, форма которого согласована с одной из допустимых форм шайб. Таким образом, подключение возможно только при единственной комбинации механических компонентов: дополнительной шайбы розетки и гнезда корпуса вилки. Изменение типа подключения достигается установкой шайбы другой формы или ее поворотом на определенный угол.

Полная блокировка подключения основана на вставках-заглушках, которыми закрываются гнезда розетки. Для удаления вставки следует воспользоваться ключом.

Защита от ошибочного или несанкционированного отключения

Известные решения по защите от отключения делятся на две основные разновидности. В основу первой положено обращение к внешним подвижным компонентам. Представлена конструкциями:

- в форме осевого подвижного по направляющим элемента с клиновидным окончанием, скос которого при нахождении элемента в переднем положении заходит под рычаг защелки вилки и блокирует его перемещение в направлении корпуса при попытке нажатия, Рисунок 4 а;
- на основе защитного кожуха, который в рабочем положении надвигается на корпус вилки и физически блокирует доступ к рычагу защелки, Рисунок 4 б.

Схема Рисунка 4 а по своему построению напоминает жесткий стержневой фиксатор двухстороннего действия, применяемый в некоторых электрических вставных модулях [7].

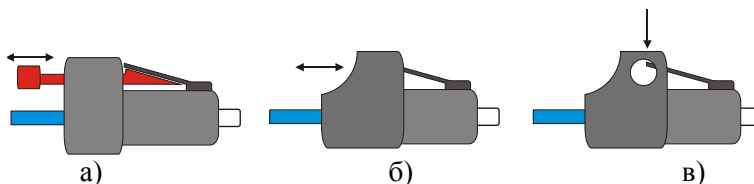


Рисунок 4 – Варианты реализации механической блокировки отключения вилок LC:
 а) с подвижным стержневым элементом блокировки; б) с подвижным кожухом;
 в) с неподвижным кожухом и использованием ключа

Для отключения необходимо воспользоваться простейшим пластиковым ключом штыревого типа (швейцарская компания Reichle & De-Massari) или инструментом (американская компания Leviton), которые линейным движением вставляются сзади в корпус кожуха.

Возможна блокировка с использованием установленного на розетке неподвижного кожуха, Рисунок 4 в. Для отключения предназначен обычный ключ, который вставляется в боковое отверстие и при повороте давит своей бородкой на рычаг в направлении корпуса, в результате чего рычаг выводится из зацепления с корпусом розетки.

Оптическая трассировка и идентификация

Решения этой группы эффективно решают задачу защиты от ошибочного отключения второго конца шнура при изменениях конфигурации физического уровня ИТС.

Их суть заключается в подсветке всего кабеля (в случае трассировки) или вилки как минимум противоположного конца (при индикации), что очень полезно перед выполнением коммутации. Для увеличения визуальной заметности подсветки задействуется режим включения – выключения источника с частотой порядка 1 Гц.

В различных маркетинговых материалах понятия трассировки и индикации часто смешиваются. Например, компании Amphenol и Ankom обозначают шнуры с оптической индикацией как Traceable Patch Cord.

Подсветка в случае индикации носит точечный характер. Источником света для идентификации вилки служит миниатюрный светодиод. Светодиод устанавливается:

- непосредственно в заднюю часть корпуса моноблочной вилки;
- в хвостовик дуплексной вилки;

- в специальную наделку, монтируемую на кабеле на расстоянии 1 – 15 см от вилки и используемую также для подключения навесного источника питания.

При идентификации включаются светодиоды обоих концов шнура.

Для трассировки используется гибкий стержневидный электролюминесцентный элемент, закладываемый под жесткую прозрачную оболочку кабеля шнура, Рисунок 5 а. Практически данное решение реализовано в системе Xtracer.

Для работы компонентов этой разновидности необходим источник электроэнергии. Она поставляется встроенным или внешним навесным источником.

Функции «бортового» источника тока возлагаются на часовую батарейку, которая укладывается в соответствующее гнездо задней части дуплексной вилки и активируется кнопкой. Для продления срока службы батарейки после использования подсветки необходимо еще раз нажать на управляющую кнопку. Возможно применение кнопки без фиксации или введение цепей ограничения времени нахождения СД во включенном состоянии. Последнее не составляет больших проблем при современном уровне развития микроэлектроники.

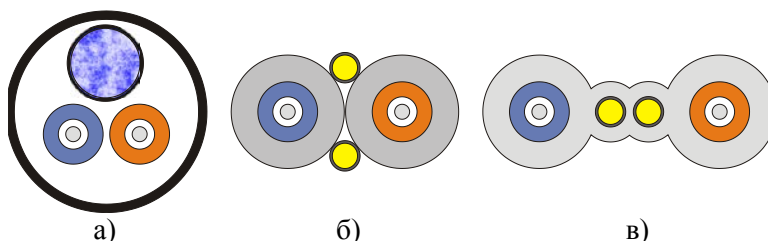


Рисунок 5 – Кабель систем оптической трассировки и идентификации:
а) оптическая трассировка Xtracer; б) оптическая идентификация с внешними проводами; в) оптическая идентификация со скрытыми проводами

Навесной блок питания подключается к соответствующим контактам вилки или отдельной выделенной фишки, устанавливаемой на кабеле на удалении 10 – 15 см от вилки. Наряду с контактами для подключения источника фишка части комплектуется индикаторным СД и рассеивателем для улучшения заметности его свечения. С учетом малого энергопотребления СД в качестве бортового источника тока часто используют часовые батарейки, а сам источник выполняется в виде брелока. Более крупные аккумуляторные источники заряжаются через стандартный USB-порт.

Для передачи напряжения питания на СД противоположного конца шнура в состав кабеля вводятся два дополнительных медных проводника. Для наиболее распространенных кабелей со структурой zip-cord проводники располагаются симметрично с двух сторон от области соединения защитных шлангов, Рисунок 5 б, что дополнительно защищает их от короткого замыкания при большом количестве шнуров [8].

Чисто оптический вариант системы идентификации применительно к вилкам LC предложен компанией Corning. Схема представляет собой развитие известного с начала 2000-х гг. решения французской компании PatchSee [9]. Общее для разработок этой группы

- использование для передачи излучения подсветки гибких пластиковых световодов с увеличенным диаметром сердцевины;
- свечение только одного конца шнура.

Основной отличием схемы Corning в том, что с целью достижения высокой эффективности идентификации в качестве оптически активной поверхности использованы не торцевые поверхности волокон, а рассеивающие элементы, которые имеют заметно большую площадь, рисунок 6. Разворот луча на 180 градусов, необходимый для обеспечения работоспособности решения, осуществлен с помощью системы внутренних зеркал [10].

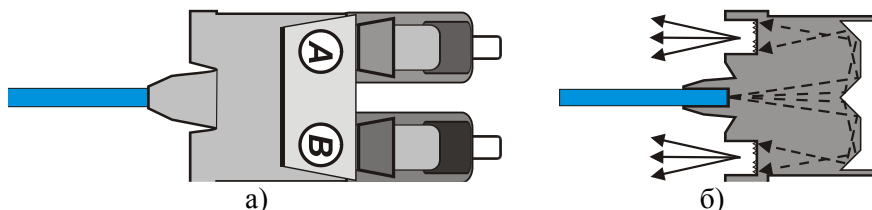


Рисунок 6 – Система оптической идентификации по предложению Corning: а) общий вид вилки с дополнительной насадкой; б) оптическая схема решения

Системы интерактивного управления

Системы интерактивного управления были разработаны и внедрены в практическую эксплуатацию в середине 90-х гг. прошлого столетия. Первоначально применялись только на уровне горизонтальной подсистемы, где обеспечивали управление медножильными компонентами СКС, т.е. там, где внедрение соответствующего программно-аппаратного комплекса давало наибольший эффект. Распространение действия интерактивного управления на оптическую подсистему произошло примерно с 5-летней задержкой.

Суть решения состоит в том, что в состав проводки вводится датчик подключения вилки шнура к розетке разъема коммутационной панели. Сигналы датчика обрабатываются контроллером и используются для автоматического изменения БД системы администрирования. Для увеличения эффективности и придания системе свойства интерактивности датчик обычно дополняется индикаторным СД, с помощью которого в процессе выполнения наряда на работу (англ. work order) оператору передаются управляющие сигналы. Число передаваемых команд увеличивается изменением цвета свечения, а также скважности и частотой перехода между состояниями «включено–выключено».

В зависимости от исполнения системы датчик может включать в себя шнуровую и панельную части или же полностью находиться на коммутационной панели.

Датчики систем интерактивного управления первых поколений выполнялись по контактной схеме. Сравнительно небольшой габариты LC заставляли выносить контакт за его габариты. Один из возможных вариантов такого решения системы АМРTrac компании АМР изображен на Рисунке 7. Дуплексная вилка основана на применении интегрального держателя, в нижней части которого предусмотрен прилив треугольной в сечении формой для установки подпружиненного штыревого контакта датчика [11].

В основе первых вариантов системы AMPTrасна лежало решение ITTrас Corporation. С учетом этой особенности контактные площадки датчика для удобства считывания информации о конфигурации кабельной системы располагались над гнездом. Поэтому к коммутационной панели вилка подключалась в перевернутом положении рычагами фиксирующих защелок вниз.

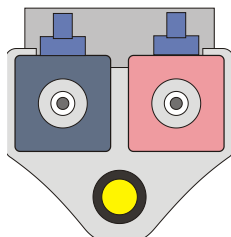


Рисунок 7 – Торцевая проекция дуплексной вилки LC системы AMPTRAC с дополнительным контактом датчика подключения шнура

Большинство современных датчиков построены по бесконтактной схеме на основе RFID-меток, которые по ближнему полю взаимодействуют с антеннами панельной части системы. Метка может работать в различных частотных диапазонах, способ ее установки зависит от ориентации линейки антенн.

Известна внешняя и внутренняя установка линейек. В первом случае линейка может располагаться в виде козырька над рядами розеток (система InteliPhy компании Reichle & De-Massari, Рисунок 8 а) или вплотную примыкать своей плоскостью к лицевой пластине коммутационной панели (системы Future-Patch немецкой компании TKM и IBDN компании Belden, Рисунок 8 б) [12]. Соответственно, метка находится под дуплексной вилкой на крепежной обойме. Во втором случае метка располагается на боковой поверхности одного из элементов пары коннекторов (ранние варианты системы Future Patch). Аналогичное по схеме решение с выносом метки с корпуса вилки на хвостовик применяется с 2018 года также в системе интерактивного управления Intelliphy швейцарской компании Reichle & De-Massari.

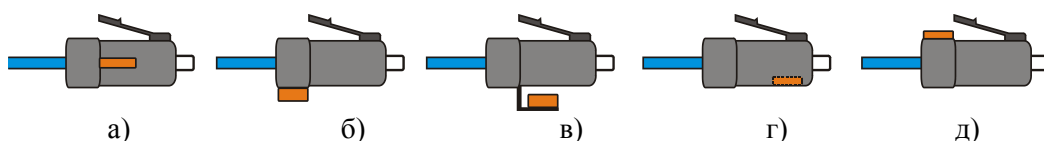


Рисунок 8 – Варианты расположения RFID-меток системы интерактивного управления на вилках LC: а) система Futute-Patch; б) система InteliPhy; в) система Volition; г) по предложению компании Fitel; д) с выносом за рычаг фиксирующей защелки

Боковое расположение RFID-метки увеличивает ширину дуплексной вилки, что не позволяет сохранить исходную величину горизонтальной плотности портов. Для устранения этого недостатка разработчик выполняет поворот розетки на 90°, а считыватель датчика размещает выше ряда розеток.

Для увеличения эксплуатационной надежности системы в целом компанией 3М на панелях кабельной системы Volition использована внутренняя установка линейки антенн. В том случае RFID-метка монтируется на Г-образном кронштейне

не под корпусом вилки и взаимодействует с линейкой через прорезь в лицевой пластине панели, Рисунок 8в.

RFID-метки отличаются хорошими массогабаритными показателями, в результате чего не исключена возможность их внутренней установки прямо в соответствующем гнезде корпуса в передней части вилки, Рисунок 8 г, [13]. Потенциально возможно размещение RFID-метки также на верхней поверхности задней части вилки за рычагом фиксирующей защелкой или же даже сбоку от свободного конца его рычага, Рисунок 8 д [14]. Малая популярность подобной схемы определяется сложностью обеспечения эффективного взаимодействия между RFID-меткой или антеннами считывающего устройства.

Область действия системы администрирования может быть распространена на сервера и иные активные сетевые устройства с одиночными портами без необходимости их подключения к ИТС по схеме кросс-коннекта. В случае прямого подключения по схеме интерконнекта необходима модернизация шнурового кабеля для подачи напряжения питания на панельную часть датчика удаленного конца. Для этого в его состав вводят один или два провода.

Выводы

1. LC-разъем как компонент коммутационного оборудования полностью выполняет требования базовых стандартов на администрирование оптической подсистемы информационной проводки СКС.

2. Коммутационное оборудование на базе LC позволяет при необходимости сравнительно простыми средствами добиться значимого увеличения эффективности администрирования вплоть до его включения в системы интерактивного управления.

3. Вспомогательные элементы увеличения эффективности относятся к опциональным, а их применение не влияет на совместимость с обычными вилками и розетками.

4. Микроэлектронные компоненты системы администрирования без труда монтируются на корпусе вилки или даже встраиваются в него; вынос их на отдельную кабельную наделку практикуется исключительно из соображений удобства подключения навесного источника питания.

Литература

1. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Введение в структурированные кабельные системы: учеб. пособие / под ред. А.Б. Семенова. М.: Издательство «Научный консультант», 2018. 206 с.
2. Семенов А.Б. Оптический разъем LC. LAN Online, 2018, № 10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osp.ru/lan/2018/10/13054558> (дата обращения 26.06.2019).
3. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / Под научной редакцией А.Б. Семенова. Москва, 2019. 126 с.
4. Семенов А.Б. Администрирование структурированных кабельных систем. М.: ДМК Пресс, 2009. 192 с.

5. Патент США 8 152 385 / МКИ G02B6/38 / Duplex fiber optic assemblies suitable for polarity reversal and methods therefor // De Jong M., Jones A.W., Staber H.J. / Заявл. 27.02.2009 / Оpubл. 10.04.2012. 34 p.
6. Патент США 7 258 493 / МКИ G02B6/38; B27N3/00; B27N3/04 / Keyed fibre optic connector // Milette L. / Заявл. 22.09.2004 / Оpubл. 21.08.2007. 34 p.
7. Патент США 7 473 124 / МКИ H01R13/627 / Electrical plug assembly with bi-directional push-pull actuator // Briant E. D., Wertz Jr. R. H., Gorenc D. L. / Заявл. 29.02.2008 / Оpubл. 06.01.2009. 14 p.
8. Патент США 7 920 764 / МКИ G02B6/44, H04B 10/00, G08B 13/14 / Electrically traceable and identifiable fiber optic cables and connectors // Kewitsch A.S. / Заявл. 02.05.2008 / Оpubл. 05.04.2011. 17 p.
9. Семенов А.Б. СЕВИТ под углом зрения СКС / Вестник связи. 2007. № 5. С. 36-40.
10. Патент США 10 101 545 / МКИ G02B6/3895, G02B6/008, G02B6/262 / Traceable cable assembly and connector // Isenhour M.C., Overcash J.L. / Заявл. 05.10.2016 / Оpubл. 16.10.2018. 19 p.
11. Патент США 7 311 539 / МКИ H01R27/00; G02B6/38 / Duplex plug adapter module // Рере Р. J., Dollyhigh D.G. / Заявл. 29.04.2005 / Оpubл. 25.12.2007. 10 p.
12. Семенов А.Б. Новинки кабельной техники СКС на выставке Exponet 2003. Вестник связи. 2004. № 1. С. 15.
13. Патент США 7 080 945 / МКИ G02B6/36; G02B6/38; G02B6/35 / Connector systems for dynamically updating information related to a network and methods for developing the connector systems // Colombo B.A., Feustel C.A., Jennings M.R., Jones S.L. et al. / Заявл. 28.12.2004 / Оpubл. 25.7.2006. 33 p.
14. Патент США 7 458 517 / МКИ G08B13/14; G01S13/08; G02B6/36; G02B6/38; G06K19/06; G08B21/00; H04B7/00; H04B10/00; H04B10/12; H04Q5/22 / Radio frequency identification of a connector by a patch panel or other similar structure // Durrant R. C.E., Fitzgibbon M. / Заявл. 13.03.2005, опубл. 02.12.2008. 15 p.

УДК 004.67

Основные аспекты методики научной работы (исследования)

Ю.В. Стрэналюк, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Рассматриваются вопросы формулировки основных аспектов научного исследования.

Научное исследование, аспекты научной работы.

The main aspects of the methodology of scientific work (research)

Yu.V. Strenalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department «Information Technologies and Control Systems»,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The questions of the formulation of the main aspects of scientific research are considered.

Scientific research, aspects of scientific work.

Рассмотрим основные аспекты научной работы (исследования).

Область исследования

Она образуется одним из способов: выделение малой области из большой, объединение областей, вычленение общей части пересекающихся областей, выделение нового аспекта в области, новый подход в той же области, создание новой области.

Тема

Состоит из 11-17 слов. Согласуется с предметом исследования.

Актуальность

Описание того, что сделано другими и что нужно еще сделать. Заключается в противоречии между потребностью практики в методиках и их отсутствием.

Объект

Объект – часть практики, с которой имеет дело исследователь.

Предмет

Предмет – аспект, в котором исследователь познает объект. Предмет близок по звучанию с темой исследования.

Проблема

Проблема – объективно возникший, в ходе развития познания, вопрос или комплекс вопросов, решение которых представляет существенный теоретический или практический интерес. Проблема заключается в противоречии между необходимостью соответствующих исследований и их отсутствием или недостаточностью.

Цель

Цель – то, что должно быть достигнуто в результате работы над темой (какой научный результат). Обычно цель – разработка методических основ формирования (воспитания, развития) у кого-либо чего-либо. Или – выявление, обоснование, проверка методических условий формирования чего-либо.

Гипотеза

Гипотеза – научное предположение, требующее доказательств.

Задачи

Задачи – цель деятельности, данная в конкретных условиях. Обычно бывают такими:

- Анализ практики и литературы.
- Формирование подхода.
- Разработка методики.
- Экспериментальная проверка методики.

Второй способ – формулирование отдельных подпроблем и подцелей.

Методологическая основа

Методологическая основа – педагогические теории и концепции, лежащие в основе работы.

Методы

Методы теоретического исследования – анализ, синтез, абстрагирование, моделирование и пр.

Методы эмпирического исследования: изучение литературы, наблюдение, эксперимент, анкетирование и пр.

Этапы

Обычно: теоретический анализ, разработка методики, эксперимент.

Теоретическая новизна

Похоже на положения, выносимые на защиту, но формулируются в разных аспектах. Ключевые слова: разработаны, раскрыты, обоснованы, определены и др.

Практическая значимость

– значение для практики. Обычно говорится о значимости для различных категорий (учителя, ученики, студенты, преподаватели) и о личном практическом вкладе соискателя.

Положения, выносимые на защиту

Обычно их 3-5: утверждение, методика, результаты. Ключевые слова: принципы, требования, обоснование, условия, содержание, модель, метод, средства, критерии.

Достоверность

Достоверность обычно связана с правильной методологией, обоснованностью и полнотой анализа проблемы, подтверждением воплощения теории в разработанной методике, экспериментальной проверкой и апробацией результатов, их внедрением.

Внедрение

Раскрывается где, когда, в какой степени внедрены результаты исследования.

Апробация

Включает в себя: публикации, выступления на конференциях, семинарах, заседаниях и т.п., а также эксперимент и опытное преподавание.

Результаты и выводы

Повторяет положения, выносимые на защиту + утверждение о верности гипотезы, теоретической новизне и практической значимости в другой формулировке, соответствующей именно результатам и выводам.

Структура работы

Обычно работа состоит из двух-трех глав. В первой главе анализируется состояние проблемы в теоретических работах и практике школы. Во второй раскрывается общий подход к решению проблемы, содержание, методы, формы, средства и оценка результатов предлагаемой методики. Отдельным параграфом (главой) описывается организация и результаты эксперимента или результаты.

Анализ литературы

Виды литературы: диссертации, монографии, учебники, методики, статьи, энциклопедии.

Далее обратим внимание на основных методических подходах

Анализ

Основные операции анализа: вычленение компонент (разложение; в т.ч. на основе таблиц), сравнение (критерии; сравнение по признакам и этапам), тенденции развития, ранжирование (для выделения главного), обобщение, абстрагирование, конкретизация, систематизация, формализация (в т.ч. анализ дефиниций), индуктивные и дедуктивные выводы.

Системный анализ. Понятие системы. Структура системы. Взаимоотношение частей. Свойства качественных систем: целеустремленность, эмергентность, организованность, полифункциональность, динамичность, полнота частей и др. Закономерности развития систем: приближение к идеалу, динамизация, согласование ритмики частей.

Методы исследования систем: определение границ системы, ее элементов и структуры, внешних связей, отдельных элементов, закономерностей развития, системообразующих связей, принципов поведения; построение моделей системы; анализ управления системой. Способы перевода системы из одного состояния в другое: новые элементы, изменение состава элементов, изменение структуры, изменение динамики, изменение взаимодействия элементов, изменение окружения, разбиение системы на части, объединение системы с другими.

Матричный метод

Столбцы и строки матрицы составляют темы или вопросы какого-либо содержания. На пересечении столбцов и строк проставляются нули и единицы для обозначения связей тем друг с другом (использование информации из одной темы в другой). Сначала попарно удаляются из матрицы строки и столбцы с одинаковыми номерами, если оба содержат одни нули (разрыв замкнутых контуров). Затем удаляем столбцы, состоящие из нулей и одноименные с ними строки. У таких тем порядок следования не меняется. Те столбцы, в которых нет только нулей (после сокращения матрицы) перемещаются назад в общей последовательности. В результате получается правильная логическая последовательность изучения тем.

Наблюдение, фотографирование, хронометраж

При наблюдении нет внешнего воздействия на наблюдаемое. Требования: иметь цель, план; наблюдать минимальное число признаков, реальность условий, сравнимость, периодичность, объективность. Виды наблюдений: постоянные, однократные, повторяющиеся (по времени); сплошные и не сплошные (по охвату); непосредственно объекта и косвенно результатов; внешнее и самонаблюдение. Таблицы наблюдений (время и действия наблюдаемых) или сравнение плана и реальности. Обычно в таблицах фиксируются фотографии и хронометраж. Последние могут сопровождаться использованием технических средств.

Анкетирование

Подписанные и анонимные анкеты, Открытые и закрытые А. Закрытые: да-нет, выбор варианта, ранжирование. Цели: получение фактов, выяснение отношения, выяснение предпочтений. Обычный минимум анкетированных – 50-100 человек.

Тестирование

Требования: объективность (независимость от места, одинаковость условий и пр.); валидность (измеряется то, что хотят проверить); надежность (одинаковость результатов при повторном тестировании); презентативность (всесторонняя проверка); сравнимость результатов; экономность (простота проведения и обработки).

Виды тестов: напоминания (ввод ответов); дополнения (дополнить часть заготовленного ответа); выборочные (выбор верного ответа); сличения (соответствие элементов в двух рядах данных); упорядочения (расположить элементы по порядку).

Экспертные оценки

Применяются при прогнозировании и для получения количественных оценок.

Виды: комиссия (дискуссия и приход к общему мнению), мозговой штурм (разделение генерации и критики идей), метод Дельфи (пересмотр анонимных ответов в три тура: первая оценка, знакомство с выводами других и коррекция своих, анализ средних и крайних мнений), обобщение независимых характеристик (обобщение разных мнений об одном ученике, явлении).

Комплексные оценки

Применяются, когда явление характеризуется несколькими показателями. Например, сумма затрат времени на задания, число ошибок во всех заданиях и т.п.

Моделирование

Моделирование – изучение модели вместо объекта (процесса). Должно соответствовать объекту (процессу) и рассматривать наиболее существенные его черты.

Формы моделей: рисунки, чертежи, схемы, таблицы, матрицы, символы, тексты, формулы.

Две группы моделей: материальные и вычислительные.

Поэлементный анализ

Содержание проверяемого разбивается на отдельные неделимые элементы. Оценивается усвоен данный элемент или нет. Анализ ведется по двум направлениям: общие характеристики усвоения элементов и их групп, усвоение отдельным учеником или группами различных элементов. ПА служит еще и для контроля того, все ли элементы проверяются в какой-либо системе оценивания. Он может применяться к анализу содержания учебной и методической литературы.

Беседа, интервью

Беседа – разветвленный диалог, в ходе которого исследователь выясняет интересующие его вопросы. Интервью – получение ответов на фиксированные вопросы (допускаются уточнения). Правила интервьюирования: наедине, кратковременность (15-20 минут), без воздействий (не подсказывать, не оценивать и т.п.), соответствие вопросов запланированным, придерживаться (при беседе – по возможности) порядка вопросов и не давать их сразу все на бумаге.

Изучение документов

Формы документов: текстовые, цифровые (статистика), иконографические (кино, фото, картины), фонетические (магнитозаписи, пластинки и др.), технические (чертежи, поделки и др.). Виды Д.: классный журнал, дневники, планы преподавателей и программы, медицинские карты, протоколы собраний, тетради

учащихся, контрольные работы, архивы, периодика, справочники, проекты учащихся, технические продукты деятельности. Виды анализа Д.: психологический (отношения), педагогический (выяснение преемственности обучения), развития учащихся (например, по сочинениям оценивается уровень умственного развития), формализованный или контент-анализ (подсчет количеств; например, частота слов, длина предложений, объем текста), технологический (например, анализ работ или компьютерных программ учащихся). Для обеспечения объективности анализа надо сопоставлять документы друг с другом.

Поисковый, формирующий, контрольный эксперимент

Поисковый – проверяются отдельные элементы методики и варианты их реализации. Формирующий – на основе коррекции результатов поискового проверяется методика целиком. Контрольный – после корректировки хода формирующего проводится окончательный эксперимент, в котором исправлены недочеты и учтены результаты ФЭ.

Шкалирование

– способ превращения качественных факторов в количественные ряды. Степень выраженности признака оценивается в баллах, например, на основе рейтинга или мнений учащихся. Метод парного сравнения: эксперт попарно сравнивает учащихся по одному признаку и присваивает ученику 2, если его уровень выше, 1, если уровни равны и 0, если уровень ниже. На основе суммы полученных баллов составляется рейтинговая последовательность (шкала). Можно использовать метод самооценки по шкале. Виды шкал: наименований (пол, национальность, интересы), порядковая (естественная последовательность, например, школьные баллы), интервальная (допускает математические операции со значениями; наиболее строгий вариант – шкала отношений).

Параметрические и непараметрические методы

Параметрические основаны на сравнении средних. Корректны, если распределение нормальное и величины приводимы на шкале отношений или (в крайнем случае) на интервальной шкале. Если эмпирическое значение t-критерия больше критического, то различие выборок считается достоверным. Критические значения находятся по специальным таблицам. Число степеней свободы = $n_1 - n_2 - 2$. Эмпирическое значение t-критерия считают, как отношение модуля разности средних значений сравниваемых рядов к квадратному корню из суммы отношений дисперсий к числу величин в рядах.

Непараметрические методы – такие, когда на параметры внимания не обращают и предположение о нормальном законе распределения не делается. Критерий знаков – если в паре учащихся один показал результат выше другого, то первому ставится «+», если ниже – «-», если одинаковы – ноль.

Литература

1. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования // М.: Либроком, 280 с.
2. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология: словарь системы основных понятий // М.: Либроком, 2013. 208 с.

3. Бахтина И.Л., Лобут А.А., Мартюшов Л.Н. Методология и методы научного познания: учебное пособие / И.Л. Бахтина, А.А. Лобут, Л.Н. Мартюшов; Урал. гос. пед. Ун-т. // Екатеринбург, 2016. 119 с.
4. Методология научного исследования: учебное пособие / Н.В. Липчиу, К.И. Липчиу // Краснодар: КубГАУ, 2013. 290 с.

УДК 539.3

**Метод определения прогибов круглых пластин
под действием гармонической поперечной нагрузки**

А.С. Кравчук, доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
лаборатория «Динамика систем и механика материалов»,
Научно-исследовательский политехнический институт,
филиал Белорусского национального технического университета, г. Минск,
А.И. Кравчук, кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования,
Белорусский государственный университет, г. Минск

Впервые решена задача изгиба круглой пластины под действием гармонического распределения интенсивности поперечной нагрузки. Впервые решение построено методом понижения порядка дифференциального оператора в уравнении прогибов пластины с четвертого до второго, что дало возможность разбить решение задачи на два этапа, на первом удовлетворить краевые условия равенства нулю вертикальных перемещений пластины и гладкости ее прогибов в центре, а на втором удовлетворить условию защемления края или равенства нулю изгибающего момента по краю пластины.

Круглая пластина, гармоническая поперечная нагрузка, понижение порядка дифференциального оператора, прогиб.

**Method for determining deflections of round plates under the action
of harmonic transverse load**

A.S. Kravchuk, Doctor Phys.-Mat. Sci., Associate professor, Leading Researcher,
Laboratory «Dynamics of Systems and Mechanics of Materials»,
Polytechnic Research Institute,
a branch of the Belarusian National Technical University, Minsk,
A.I. Kravchuk, Candidate Phys.-Mat. Sci., Associate Professor, Associate Professor,
Department of web technologies and computer modeling
of the Belarusian State University, Minsk

For the first time, the problem of bending a circular plate under the action of the harmonic distribution of the intensity of a transverse load was solved. For the first time, the solution was constructed by lowering the order of the differential operator in the plate deflections equation from fourth to second order, which made it possible to divide the solution of the problem into two stages. At the first stage, the boundary conditions for the equality to zero of vertical displacements of the plate and the smoothness of its deflections in the center were satisfied. At the second stage, either the edge pinching condition or zero bending moment condition on the edge of the plate was satisfied.

Round plate, harmonic transverse load, lowering the order of the differential operator,

deflection.

Введение. Бигармонические уравнения, представляющие собой дифференциальные уравнения в частных производных 4-го порядка, играют важную роль в механике сплошных сред при моделировании поведения упругих пластин под нагрузкой [1, 2]. Это объясняется тем, что решения бигармонического уравнения имеют тесную связь с основными величинами, изучаемыми в теории упругости (напряжения и смещения), а интегрирование бигармонического уравнения составляет одну из основных задач теории упругости [3, 4].

Под гармоническим нагружением круглой пластины авторы понимают поперечную нагрузку, удовлетворяющую уравнению Лапласа в полярных координатах. Данный вид нагружения не рассматривался ранее в литературе, а полученное авторами решение не совпадает с общим решением Клебша для круглой пластины, изгибающейся под действием произвольной нагрузки [5, с. 111-112]. Это подчеркивает самостоятельную значимость полученных теоретических результатов.

Установлено, что необходимо дополнительное краевое условие о гладкости прогибов пластины в ее центре иначе единственного физически адекватного решения получить невозможно.

Несмотря на обилие работ, посвященных решению бигармонического уравнения, до настоящего времени никто не использовал метод понижения порядка бигармонического оператора до гармонического. Хотя это дает возможность существенно повысить наглядность изложения результатов, с помощью разбиения решения уравнений прогибов круглой пластины на два этапа: первый – удовлетворение условий равенства нулю перемещений на краю пластины и гладкости решения в ее центре, а второй – удовлетворение условий защемления или равенства нулю изгибающего момента на краю пластины.

Общие уравнения изгиба круглой пластины, нагруженной поперечной нагрузкой. Рассматривается круглая пластина радиуса R и толщиной h с центром в начале полярных координат [4, с. 194; 5, с.110]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) = \frac{q(r, \theta)}{D}, \quad (1)$$

где $w(r, \theta)$ функция поперечных перемещений круглой пластины (вдоль оси Oz), $q(r, \theta)$ – интенсивность поперечной нагрузки, удовлетворяющая гармоническому уравнению:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) q(r, \theta) = 0. \quad (2)$$

Цилиндрическая жесткость пластины D определяется уравнением [4, с.178]:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

При этом одними из краевых условий является опирание по краю и условие гладкости решения в центре пластины:

$$w(R, \theta) = 0, \quad \left. \frac{\partial w(r, \theta)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

Условие гладкости решения краевой задачи (3) для уравнения (1) никогда не обсуждалось ранее [4, с. 196-197; 5 с.111], тем не менее, это одно из основных условий без которых невозможно построить однозначного физически адекватного решения никакой из задач для изгиба круглых пластин.

Дополнительные краевые условия, определяющие характер опирания будут рассматриваться ниже при окончательном определении вида решения.

Учитывая, что $q(r, \theta)$ являются гармонической функцией (2), то используя известные свойства аналитических функций комплексного переменного [6], ее можно представить в виде сходящегося ряда:

$$q(r, \theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^n}{R^n} \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n \cdot \sin(n \cdot \theta)), \quad (4)$$

где A_n ($n = 0, \infty$), B_n ($n = 0, \infty$) – вещественные константы.

Понизим порядок с помощью замены. Замена, понижающая порядок дифференцирования в бигармоническом уравнении (1) до гармонического, имеет вид:

$$w(r, \theta) = W(r, \theta) \cdot (r^2 + C), \quad (5)$$

где $W(r, \theta)$ – некоторая функция двух переменных, C – вещественная константа, которая будет определяться из второго краевого условия, определяющего защемление, шарнирное опирание [5, с. 111].

Простой заменой декартовых координат на полярные в бигармоническом уравнении [4, с. 87; 7, с. 20-21] учитывая очевидные равенства $x = r \cdot \cos(\theta)$,

$y = r \cdot \sin(\theta)$, $\frac{1}{\partial x} = \frac{\cos(\theta)}{\partial r}$ и $\frac{1}{\partial y} = \frac{\sin(\theta)}{\partial r}$ и подставляя (5) в (1) можно получить:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) = \quad (6) \\ & = 16 \cdot \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) + 8 \cdot r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) + \\ & + (r^2 + C) \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right). \end{aligned}$$

Будем рассматривать еще одну гармоническую функцию $q_0(r, \theta)$, т.е. функцию удовлетворяющую уравнению (2) внутри круга, занимаемого пластиной. Ее также можно представить в виде сходящегося ряда:

$$q_0(r, \theta) = A_0^* + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^n}{R^n} \cdot (A_n^* \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n^* \cdot \sin(n \cdot \theta)), \quad (7)$$

где A_n^* ($n = 0, \infty$), B_n^* ($n = 0, \infty$) - вещественные константы.

Пусть

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} = \frac{q_0(r, \theta)}{D}. \quad (8)$$

Тогда, учитывая (1), (6), (8), функция $q_0(r, \theta)$ должна удовлетворять дифференциальному уравнению:

$$16 \cdot q_0(r, \theta) + 8 \cdot r \cdot \frac{\partial q_0(r, \theta)}{\partial r} = q(r, \theta).$$

Общее решение последнего можно записать:

$$q_0(r, \theta) = \frac{C_1}{r^2} + \frac{1}{8 \cdot r^2} \int_0^r \xi \cdot q(\xi, \theta) d\xi. \quad (9)$$

Исходя из сделанных предположений, $q_0(r, \theta)$ является вещественной частью аналитической в круге радиуса R функцией, а, следовательно, ограничена в рассматриваемой области. Из этого следует, что $C_1 = 0$.

Из (9) следует, что коэффициенты сходящихся рядов $q(r, \theta)$ (4) и $q_0(r, \theta)$ (7) связаны равенствами:

$$A_n^* = \frac{1}{8 \cdot (n+2)} A_n \quad (n = 0, \infty), \quad B_n^* = \frac{1}{8 \cdot (n+2)} B_n \quad (n = 1, \infty). \quad (10)$$

Очевидно, что преобразование (10) не ухудшает сходимость соответствующего ряда для $q_0(r, \theta)$ (7) по сравнению со сходимостью ряда для $q(r, \theta)$ (4).

Таким образом, исходное уравнение (1) сведено к уравнению (8). При этом из (3) и (5) следуют краевые условия для $W(r, \theta)$:

$$W(R, \theta) = 0, \quad \left. \frac{\partial W(r, \theta)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (11)$$

Будем в дальнейшем считать, что:

$$W(r, \theta) = \psi_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(r) \cdot (A_n^* \cdot \cos(n\theta) + B_n^* \cdot \sin(n\theta)), \quad (12)$$

где $\psi_n(r)$ – вещественные функции одной переменной.

Учитывая (7), (10) и (12), будем считать, что $\psi_n(r)$ должна удовлетворять одному из уравнений:

$$\frac{\partial^2 \psi_0(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi_0(r)}{\partial r} = \frac{A_0}{16 \cdot D}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_n(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi_n(r)}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi_n(r)}{\partial \theta^2} = \frac{r^n}{D \cdot R^n} \quad (n = 1, \infty). \quad (14)$$

При этом для $\psi_n(r)$ выполняются краевые условия:

$$\psi_n(R) = 0, \quad \left. \frac{d\psi_n(r)}{dr} \right|_{r=R} = 0 \quad (n = 0, \infty). \quad (15)$$

Построение решения задачи для постоянной нагрузки для различных краевых условий. Пусть на пластину действует поперечная нагрузка интенсивности $q(r) = A_0$, тогда уравнение (1) с краевыми условиями (3) можно свести к уравнению (13). С естественными краевыми условиями $\psi_0(R) = 0$,

$\left. \frac{d\psi_0(r)}{dr} \right|_{r=0} = 0$ уравнение (13) имеет единственное решение вида:

$$\psi_0(r) = \frac{A_0}{64 \cdot D} (r^2 - R^2).$$

С помощью (5), (12) запишем общее решение поставленной задачи:

$$w(r) = \frac{A_0}{64 \cdot D} \cdot (r^2 - R^2) \cdot (r^2 + C). \quad (16)$$

Константу C определим исходя из дополнительных условий на контуре круглой пластины. Если рассмотреть самое простое условие заземления края круговой пластины [4, с. 197; 5, с.111]:

$$\left. \frac{dw(r)}{dr} \right|_{r=R} = 0, \quad (17)$$

то из (16), (17) не сложно получить уравнение:

$$\frac{A_0}{32 \cdot D} R \cdot (C + R^2) = 0.$$

Откуда следует, что $C = -R^2$. Таким образом, при заземленном крае можно получить окончательное известное решение [4, с. 197; 5, с.113]:

$$w(r) = \frac{A_0}{64 \cdot D} \cdot (r^2 - R^2)^2. \quad (18)$$

Если рассмотреть шарнирное опирание [4, с. 196; 5, с.111], то дополнительным краевым условием к условию (2) будет равенство нулю момента на краю круглой пластины $M_r|_{r=R} = 0$. При осесимметричной нагрузке это можно записать следующим образом [4, с. 195; 5, с.110]:

$$M_r|_{r=R} = -D \cdot \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right) \Big|_{r=R} = 0,$$

где ν – коэффициент Пуассона материала пластины.

После преобразований из (18) можно получить уравнение:

$$\frac{A_0}{32 \cdot D} (C(1 + \nu) + R^2(5 + \nu)) = 0.$$

Таким образом, при шарнирном опирании можно получить окончательное известное решение [4, с. 196, 5 с.113]:

$$w(r) = \frac{A_0}{64 \cdot D} \cdot (r^2 - R^2) \cdot \left(r^2 - R^2 \frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right). \quad (19)$$

Поперечная гармоническая нагрузка, имеющая первую степень радиальной координаты. Пусть на пластину действует поперечная нагрузка интенсивности $q(r, \theta) = \frac{r}{R} \cdot (A_1 \cdot \cos(\theta) + B_1 \cdot \sin(\theta))$, тогда уравнение (1) с краевыми

условиями (3) можно свести к уравнению (14) при $n = 1$:

$$\frac{\partial^2 \psi_1(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi_1(r)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi_1(r)}{\partial \theta^2} = \frac{r}{D \cdot R}.$$

Последнее уравнение с краевыми условиями (15) $\psi_1(R) = 0$,

$\frac{d\psi_1(r)}{dr} \Big|_{r=0} = 0$ имеет решение в виде:

$$\psi_1(r) = \frac{r^2 - R^2}{8 \cdot D} \cdot \frac{r}{R}.$$

С помощью (5), (10) и (12) запишем полное решение поставленной задачи:

$$w(r) = \frac{r^2 - R^2}{192 \cdot D} \cdot \frac{r}{R} \cdot (r^2 + C) \cdot (A_1 \cdot \cos(\theta) + B_1 \cdot \sin(\theta)).$$

В случае защемления края круговой пластины [4, с. 197; 5, с.111] должно выполняться условие (17). Тогда не сложно получить уравнение:

$$\frac{R}{4 \cdot D} \cdot (C + R^2) = 0.$$

Откуда следует, что $C = -R^2$. Таким образом, при защемленном крае при рассматриваемом распределении интенсивности нагрузки можно получить окончательное решение в виде:

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)^2}{192 \cdot D} \cdot \frac{r}{R} \cdot (A_1 \cdot \cos(\theta) + B_1 \cdot \sin(\theta)). \quad (20)$$

В случае свободного края пластины должно выполняться краевое условие [5 с.110]:

$$M_r|_{r=R} = -D \cdot \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \cdot \left(\frac{dw}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \right) \Big|_{r=R} = 0. \quad (21)$$

Тогда из (21) можно получить равенство:

$$C = -R^2 \frac{7 + \nu}{3 + \nu}.$$

В окончательном виде получаем решение для шарнирного опирания пластины под действием рассматриваемой нагрузки:

$$w(r) = \frac{r^2 - R^2}{192 \cdot D} \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(r^2 - R^2 \frac{7 + \nu}{3 + \nu} \right) \cdot (A_1 \cdot \cos(\theta) + B_1 \cdot \sin(\theta)). \quad (22)$$

Гармоническое нагружение, имеющее в представлении вторую степень радиальной координаты. Пусть на пластину действует поперечная нагрузка

интенсивности $q(r, \theta) = \frac{r^2}{R^2} \cdot (A_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + B_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta))$, тогда уравнение

(1) с краевыми условиями (3) можно свести к уравнению (14), которое запишется в виде:

$$\frac{\partial^2 \psi_2(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi_2(r)}{\partial r} - \frac{4}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi_2(r)}{\partial \theta^2} = \frac{r^2}{D \cdot R^2}. \quad (23)$$

С краевыми условиями (15) $\psi_2(R) = 0$, $\left. \frac{d\psi_2(r)}{dr} \right|_{r=0} = 0$ уравнение (23)

имеет решение:

$$\psi_2(r) = \frac{r^2 - R^2}{12 \cdot D} \cdot \frac{r^2}{R^2}.$$

С помощью (5), (10) и (12) запишем полное решение поставленной задачи:

$$w(r) = \frac{r^2 - R^2}{384 \cdot D} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot (r^2 + C) \cdot (A_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + B_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)).$$

В случае защемления края круговой пластины [4, с. 197; 5, с.111] должно выполняться условие (17). Откуда, как не сложно заметить, следует равенство $C = -R^2$.

Таким образом, при защемленном крае круглой пластины в этом случае можно получить окончательное решение в виде:

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)^2}{384 \cdot D} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot (A_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + B_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)). \quad (24)$$

В случае свободного края пластины должно выполняться краевое условие (21) [5, с.110]. Откуда можно получить уравнение:

$$C = -R^2 \frac{9 + \nu}{5 + \nu}.$$

В окончательном виде получаем решение для шарнирного опирания пластины под действием рассматриваемой нагрузки:

$$w(r) = \frac{r^2 - R^2}{384 \cdot D} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot \left(r^2 - R^2 \frac{9 + \nu}{5 + \nu} \right) \cdot (A_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + B_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)), \quad (25)$$

Решение для гармонического нагружения, имеющего в представлении третью степень радиальной координаты. Пусть на пластину действует поперечная нагрузка интенсивности $q(r, \theta) = \frac{r^3}{R^3} \cdot (A_3 \cdot \cos(3 \cdot \theta) + B_3 \cdot \sin(3 \cdot \theta))$, тогда

уравнение (1) с крайевыми условиями (3) можно свести к уравнению (14), которое запишется в виде:

$$\frac{\partial^2 \psi_3(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi_3(r)}{\partial r} - \frac{9}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi_3(r)}{\partial \theta^2} = \frac{r^3}{D \cdot R^3}. \quad (26)$$

С крайевыми условиями (15) $\psi_3(R) = 0$, $\left. \frac{d\psi_3(r)}{dr} \right|_{r=0} = 0$ уравнение (26)

имеет решение в виде:

$$\psi_3(r) = \frac{r^2 - R^2}{16 \cdot D} \cdot \frac{r^3}{R^3}.$$

С помощью (5), (10) и (12) запишем полное решение поставленной задачи:

$$w(r) = \frac{r^2 - R^2}{640 \cdot D} \cdot \frac{r^3}{R^3} \cdot (r^2 + C) \cdot (A_3 \cdot \cos(3 \cdot \theta) + B_3 \cdot \sin(3 \cdot \theta)).$$

В случае защемления края круговой пластины [4, с. 197; 5, с.111] должно выполняться условие (17). Откуда не сложно заметить, что следует равенство $C = -R^2$.

Таким образом, при защемленном крае можно получить окончательное решение в виде:

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)^2}{640 \cdot D} \cdot \frac{r^3}{R^3} \cdot (A_3 \cdot \cos(3 \cdot \theta) + B_3 \cdot \sin(3 \cdot \theta)). \quad (27)$$

В случае свободного края пластины должно выполняться краевое условие (21) [5, с.110]. Откуда можно получить уравнение:

$$C = -R^2 \frac{11 + \nu}{7 + \nu}.$$

В окончательном виде получаем решение для шарнирного опирания пластины под действием рассматриваемой нагрузки:

$$w(r) = \frac{r^2 - R^2}{640 \cdot D} \cdot \frac{r^3}{R^3} \cdot \left(r^2 - R^2 \frac{11 + \nu}{7 + \nu} \right) \cdot (A_3 \cdot \cos(3 \cdot \theta) + B_3 \cdot \sin(3 \cdot \theta)). \quad (28)$$

Произвольная n-я степень радиальной координаты в представлении гармонической нагрузки. Исходя из подготовительных вычислений, проделан-

ных в пунктах 4-6, можно записать решение для произвольной степени n радиальной координаты в представлении гармонической нагрузки.

Таким образом, решение уравнения (14) с краевыми условиями (15) для произвольного n определяется формулой:

$$\psi_n(r) = \frac{r^2 - R^2}{4 \cdot (n+1) \cdot D} \cdot \frac{r^n}{R^n}.$$

Тогда решение для защемленной по краю пластины (17) по аналогии с (20), (24), (27) примет вид:

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)^2}{D} \cdot \frac{r^n}{R^n} \cdot \frac{A_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n \cdot \sin(n \cdot \theta)}{32 \cdot (n+1) \cdot (n+2)}, \quad (29)$$

а в случае шарнирного опирания по аналогии с (22), (25), (28) можно записать:

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)}{D} \cdot \frac{r^n}{R^n} \cdot \left(r^2 - R^2 \frac{5 + 2 \cdot n + \nu}{1 + 2 \cdot n + \nu} \right) \cdot \frac{A_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n \cdot \sin(n \cdot \theta)}{32 \cdot (n+1) \cdot (n+2)}. \quad (30)$$

Построение общего решения для интенсивности нагрузки в виде разложения в бесконечный ряд. Из (18), (29) следует, что общее решение в случае защемления пластинки по краю для нагрузки в виде ряда (4) будет иметь вид:

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)^2}{D} \cdot \left(\frac{A_0}{64} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^n}{R^n} \frac{A_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n \cdot \sin(n \cdot \theta)}{32 \cdot (n+1) \cdot (n+2)} \right).$$

В случае шарнирного опирания пластинки по краю, принимая во внимание решения (19), (30) можно записать общее решение для нагрузки в виде ряда (4):

$$w(r) = \frac{(r^2 - R^2)}{D} \left(\frac{A_0}{64} \left(r^2 - R^2 \frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r^n}{R^n} \left(r^2 - R^2 \frac{5 + 2 \cdot n + \nu}{1 + 2 \cdot n + \nu} \right) \cdot \frac{A_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n \cdot \sin(n \cdot \theta)}{32 \cdot (n+1) \cdot (n+2)} \right) \right).$$

Заключение. Впервые решена задача изгиба круглой пластинки под действием гармонического распределения интенсивности поперечной нагрузки.

Установлено, что необходимо дополнительное краевое условие гладкости прогибов пластины в ее центре, иначе единственного физически адекватного решения получить невозможно.

Впервые решение построено методом понижения порядка дифференциального оператора с четвертого до второго, что дало возможность разбить решение задачи на два этапа, на первом удовлетворялись краевые условия равенства нулю вертикальных перемещений пластины и гладкости прогибов пластины в центре, а на втором – условие защемления или равенства нулю изгибающего момента по краю.

Частное решение, полученное для поперечной нагрузки постоянной интенсивности, полностью совпало с известными результатами.

Решение, построенное в данной статье в явном виде, не следует из общего известного решения Клебша, приведенного в монографии [5, с.111-112], что подчеркивает самостоятельную теоретическую значимость результатов данного исследования.

Литература

1. Ряжских В.И., Слюсарев М.И., Попов М.И. Численное интегрирование бигармонического уравнения в квадратной области // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 1. 2013. Вып. 1. С. 52-62.
2. Антропова Н.А. Применение представлений Альманси в численном исследовании математических моделей, описываемых гармоническим и бигармоническим уравнениями: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 05.13.18. Челябинск, 2013. 141 с.
3. Гахов Ф.Д. Краевые задачи // М.: Наука, 1977. 640 с.
4. Жемочкин Б.Н. Теория упругости // М.: Гостройиздат, 1957. 257 с.
5. Журавков М.А., Старовойтов Э.И. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности // Минск: БГУ, 2011. 543 с.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного // М.: Наука, 1973. 749 с.
7. Арамонович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики // М.: Наука, 1969. 287 с.

УДК 539/538.9

Моделирование эрозионных процессов в конструкционных материалах космических аппаратов при воздействии полиэнергетических пучков ионов

Часть 2 (Сравнение экспериментальных и расчетных результатов)

С.Е. Сабо, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техники и технологии»,
А.Д. Донской, доцент кафедры «Математики и естественнонаучных дисциплин»,

И.В. Бугай, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Математики и естественнонаучных дисциплин»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Проведены расчеты коэффициентов распыления, пробегов и энерговыделения имплантируемых ионов. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Ионное облучение, полиэнергетические пучки ионов, коэффициент распыления.

**Modeling of erosion processes in the structural materials of spacecraft under irradiation by ion beams with a wide energy spectrum
Part 2 (comparison of experimental and calculated results)**

S.E. Sabo, Ph. D., Associate Professor of the Department
of engineering and technology,

A.D. Donskoy, Associate Professor of t of mathematics and natural Sciences,

I.V. Bugay, Ph. D., Associate Professor of t of mathematics and natural Sciences,
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The calculations of the coefficients of sputtering, mileage and energy release of the implanted ions are carried out. The results are compared with experimental data.

Ion irradiation, ion beams with a wide energy spectrum, sputtering coefficient.

Сравнение экспериментальных и расчётных данных. С использованием программы SRIM проведены численные расчёты коэффициентов распыления облучаемых материалов, величин пробегов ионов и распределение выделения энергии в упругих столкновениях по глубине, а также распределение смещённых атомов облучаемых материалов. Расчёты выполнены в предположении аморфной структуры облучаемых материалов с использованием потенциала Биерзака-Циглера. В таблице 1 приведены справочные и расчетные данные для облучаемых материалов.

Таблица 1 – Справочные и расчетные данные облучаемых материалов

Свойства	Ti	Fe	Cu	Mo	W
E_d , эВ	22	22	19	46	56
U_0 , эВ	4,89	4,34	3,52	6,83	8,68
N , $\times 10^{22}$ ат/см ³	5,686	8,482	8,453	6,406	6,338
ρ , г/см ³	4,518	7,866	8,92	10,206	19,35
$R_p(He^+)$, нм	49,3	33,4	35,4	30,5	25,4
$N_{cm}(He^+)$, ат/ион	43	57	83	14	8,23
$N_d(He^+)$, ат/ион(ПВА)	3,8	3,56	3,64	1,91	1,29
$S_p(He^+)$, ат/ион	0,06	0,15	0,28	0,07	0,06
$R_p(Ar^+)$, нм	8,1	5,0	4,9	5,3	4,8
$N_{cm}(Ar^+)$, ат/ион	144,9	180,6	236,9	73,9	61,4
$N_d(Ar^+)$, ат/ион(ПВА)	7,1	7,03	7,48	4,48	3,43
$S_p(Ar^+)$, ат/ион	1,7	4,5	7,5	3,02	3,18

Экспериментальные результаты по воздействию полиэнергетического пучка ионов на конструкционные материалы приведены в первой части данной работы, в Таблице 2 и в работах [1-6].

Таблица 2 – Коэффициенты распыления и толщина распылённого слоя для изучаемых материалов ($\Phi_1=2,0 \cdot 10^{18}$ ион/см² для ионов Ar^+ и $\Phi_2=2,5 \cdot 10^{18}$ ион/см² для ионов He^+)

	$S_p(He^+)$, ат/ион	ΔR_a , нм	x , нм	$S_p(Ar^+)$, ат/ион	ΔR_a , нм	x , нм
W	$(2,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$	58±8	14±3	4,0±1,0	60±8	$(1,4 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Mo	$(2,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$	21±6	13±3	4,0±1,0	63±4	$(1,2 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Cu	$(24 \pm 1) \cdot 10^{-2}$	66±9	56±2	11,0±1,0	84±10	$(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Fe	$(15 \pm 1) \cdot 10^{-2}$	64±8	39±2	9,0±1,0	49±8	$(2,3 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Ti	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	18±7	8±3	4,0±1,0	27±6	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^3$

Таблица 3 – Экспериментальные и теоретические величины коэффициентов распыления и уточняющие коэффициенты

Коэффициент распыления	Fe	Cu	Ti	Mo	W
$S_p(He^+)$, ат/ион, эксперимент	0,15	0,24	0,01	0,02	0,02
$S_p(He^+)$, ат/ион, расчет	0,15	0,28	0,06	0,07	0,06
$S_p(Ar^+)$, ат/ион, эксперимент	9	11	4	4	4
$S_p(Ar^+)$, ат/ион, расчет	4,5	7,5	1,7	3,02	3,18
Уточняющий коэффициент					
$K_s(He^+) = S_{экс} / S_{рас}$	1	0,86	0,17	0,29	0,33
$K_s(Ar^+) = S_{экс} / S_{рас}$	2	1,47	2,35	1,32	1,26

Сравнение S_p таблиц 1 и 2 позволяет утверждать о наличии корреляции

между полученными экспериментально и рассчитанными теоретически значениями коэффициентов распыления. Выделяются две группы материалов: с низкими значениями S_p (Ti, Mo, W) и с высокими значениями S_p (Cu, Fe). При этом получено, что экспериментальные значения коэффициентов для ионов гелия и тугоплавких металлов меньше расчётных в несколько раз, а для ионов аргона несколько больше расчётных.

Значения полученных уточняющих коэффициентов приведены в таблице 3.

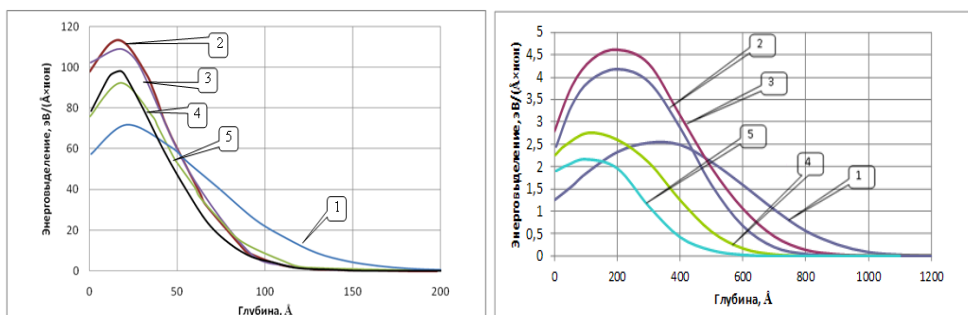


Рисунок 1 – Распределение энергии, выделившейся в смещающих столкновениях с ионами He⁺ и Ar⁺, по глубине: 1 – Ti; 2 – Fe; 3 – Cu; 4 – Mo; 5 – W

На рисунке 1 приведены графики распределения энергии, выделенной в смещающих столкновениях, по глубине мишени. При бомбардировке ионами He⁺ энерговыделение в Cu (4,7 эВ/Å) и Fe (4,3 эВ/Å) примерно в 2 раза превосходит энерговыделение в Ti (2,5 эВ/Å), Mo (2,5 эВ/Å), W (2,0 эВ/Å). Для ионов Ar⁺ наблюдается такая же зависимость, только более слабая. Пик выделения энергии происходит на глубине 20 нм для ионов He⁺ и 2 нм для ионов Ar⁺ для всех рассматриваемых металлов. Наблюдается корреляция с экспериментальными результатами в разделении изученных материалов на 2 группы.

При облучении ионами He⁺ пики распределения следующие: для W – 20 нм, для Ti – 60 нм, для Cu, Fe, Mo – 30–40 нм. На рисунке 20 показана толщина распылённого слоя и предположительная форма конечного распределения внедрённых ионов Ar⁺ по глубине.

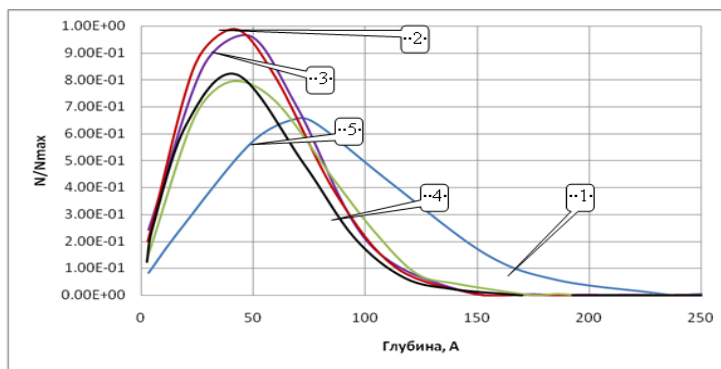


Рисунок 2 – Распределение внедренных ионов Ar⁺ в соответствующих мишенях по глубине: 1 – Ti; 2 – Fe; 3 – Cu; 4 – Mo; 5 – W

Из рисунков 1-2 видно, что для Fe и Cu величина распылённого слоя сравнима с величиной пробегов ионов He^+ . При этом на поверхности оказывается пик концентрационного распределения внедрённых ионов по глубине. Для Mo и W толщина распылённого слоя меньше величины пробегов ионов. Этим объясняется наличие большого количества пор на поверхности облученных образцов, а также большие размеры пор для образцов Fe и Cu, чем для W и Mo.

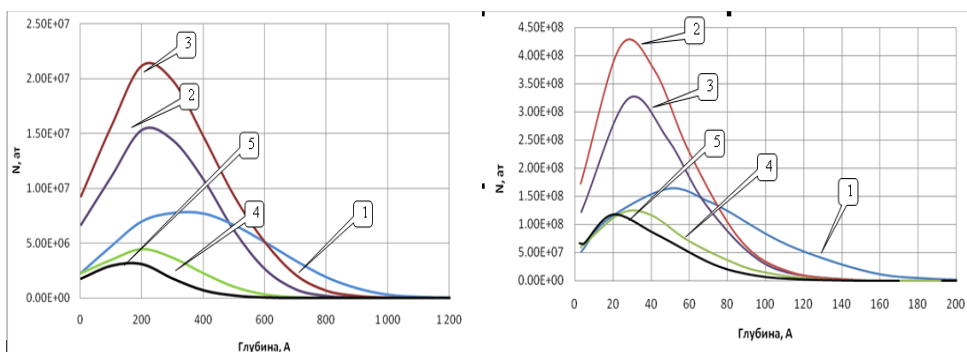


Рисунок 3 – Распределение смещённых атомов облучаемых ионами He^+ и Ag^+ материалов по глубине: 1 – Ti; 2 – Fe; 3 – Cu; 4 – Mo; 5 – W

На рисунке 3 представлены графики распределения смещённых атомов в облучаемых материалах по глубине. В обоих случаях можно выделить 2 группы элементов, число смещённых атомов которых значительно отличается. В первую группу попадают Fe и Cu, для которых число смещённых атомов соответственно $1,6 \cdot 10^7$ ат. и $2,2 \cdot 10^7$ ат. в случае облучения ионами He^+ и $3,2 \cdot 10^8$ ат. и $4,2 \cdot 10^8$ ат. в случае облучения ионами Ag^+ . Во вторую группу попадают Mo и W, для которых число смещённых атомов соответственно $4 \cdot 10^6$ ат. и $3 \cdot 10^6$ ат. в случае облучения ионами He^+ и $1,2 \cdot 10^8$ ат. в случае облучения ионами Ag^+ . Наблюдается корреляция с экспериментальными данными.

Распределение по глубине смещённых атомов не позволяет разделить исследуемые материалы на 2 группы. Корреляция с экспериментальными данными в этом случае не наблюдается.

1. Анализ полученных результатов свидетельствует, что наилучшие характеристики, как по стойкости, так и по затратам массы и физическим параметрам у образцов из титана, а наихудшие у меди и железа. Тугоплавкие металлы молибден и вольфрам показали неплохую стойкость к эрозии поверхности, но проигрывают титану из-за высокой плотности и сложностей обработки.
2. Проведены эксперименты по разработанной методике и измерены величины коэффициентов распыления поликристаллических образцов Ti, Fe, Cu, Mo, W при облучении пучками ионов He^+ и Ag^+ в интервале температур $T=100-500C^0$.
3. Установлено, что величины коэффициентов распыления материалов с ростом температуры изменяются в пределах погрешностей измерений. Наилучшие характеристики для разных пучков ионов и температур показали образцы титана.

4. Показано, что шероховатость поверхности материалов Ra с увеличением температуры облучения от 100 до 500С⁰ снижается, и зависит от толщины распыленного слоя □
5. Методами оптической и растровой электронной микроскопии выявлено образование каналов – пор с характерными поперечными размерами (1 – 3 мкм для Fe и Cu; ~0,1 мкм для W и Mo), которые предположительно связаны с условиями накопления внедренных атомов гелия и аргона (медь, железо, молибден, вольфрам). Установлено, что максимальный поперечный размер пор наблюдается у образцов с большим коэффициентом распыления ($S_p(\text{Ar}^+)=11$ ат/ион; $S_p(\text{He}^+)=0,12$ ат/ион). Плотность пор постоянна за исключением образцов меди (с ростом температуры плотность пор растет (от $8,4 \cdot 10^4$ до $6,4 \cdot 10^5$)).

Литература

1. Калинин Б.А., Гладков В.П., Волков Н.В., Сабо С.Е., Петров В.И., Рыбалко В.Ф., Толстолуцкая Г.Д., Копанец И.Е. Проникновение примесных атомов в материалы при воздействии полиэнергетическим пучком ионов аргона // Известия РАН серия: Металлы, 1994. № 6. С.69-73.
2. Калинин Б.А., Волков Н.В., Сабо С.Е. и др. Формирование ионно-легированного слоя для повышения эксплуатационных свойств циркониевых сплавов // Сборник V Научно-практической конференции материаловедческих обществ России «Цирконий: металлургия, свойства, применение» // 2008. С.41-43.
3. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П. Ионно-лучевое перемешивание при облучении металлов // Итоги науки и техники. серия: Пучки заряженных частиц и твердое тело. Распыление // М.: ВИНТИ, 1993. Т. 7. С.54-81.
4. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел // Сборник статей // М.: Мир, 1989. 349с.
5. Сабо С.Е. Дислокационно-динамический механизм проникновения примеси в глубь материала и результаты анализа «эффекта дальнего действия» при облучении полиэнергетическими пучками ионов // Информационно-технологический вестник, 2016. Т. 09. № 3. С. 119-133.
6. Сабо С.Е., Волков Н.В., Донской А.Д., Штрафина Е.Д. Имитация влияния космической радиации на эрозию конструкционных материалов // Информационно-технологический вестник, 2014. № 1(01). С. 50-57.

УДК 621.794

**Исследование камневидного излома стали 35ХГСЛ
при электродуговой выплавке**

М.Л. Скрыбин, кандидат технических наук, доцент,

А.И. Чупраков, кандидат технических наук, доцент,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Вятская государственная сельскохозяйственная академия
(ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), г. Киров

В работе рассмотрена классификация дефектов отливок, получаемых при электродуговой выплавке. Особый интерес для исследователей представляет камневидный и нафталинистый изломы, но четкого механизма, объясняющего его происхождение, до сих пор нет. Камневидный излом характеризуется четко выраженной однородной поверхностью, по которой происходит разрушение. На границах зерен присутствуют ограничено растворимые в аустените фазы, состоящие из мелких частиц или отдельных пленок, образованных из оплавленных эвтектик. Также стоит отметить, что чаще всего камневидный излом наблюдается именно по границам зерен.

Сталь 35ХГСЛ, камневидный излом.

The study lithoidal fracture of steel at electric arc smelting 35HGSL

M.L. Scriabin, candidate of technical Sciences, associate Professor,

A.I. Chuprakov, candidate of technical Sciences, associate Professor,

Federal state budgetary educational institution of higher professional education Vyatka state agricultural Academy (University at Vyatka state agricultural Academy), Kirov

The paper deals with the classification of defects of castings obtained by electric arc smelting. Of particular interest to researchers is the rock-like and naphthalene fracture, but there is still no clear mechanism explaining its origin. A stone-like fracture is characterized by a clearly defined uniform surface over which the fracture occurs. Grain boundaries are partially soluble in the austenite phase, consisting of fine individual particles or films formed from molten eutectics. It is also worth noting that in most cases, the stone-like fracture is observed at the grain boundaries.

Steel 35HGSL, lithoidal fracture.

Для повышения качества выпускаемых современной промышленностью деталей одной из главных операций является своевременное выявление отдельных дефектов, которые во время работы могут привести к необратимым последствиям.

Производственный дефект металлических материалов это отклонение от качественного состава или предусмотренных технических параметров. Сюда можно отнести отклонения от химического и фазового состава, состояние поверх-

ностного слоя и т.д.

В целом, абсолютно в любом металлическом материале или сплаве присутствуют те или иные дефекты, но часть из них незначительные, что практически не сказывается на качестве готовой продукции. Именно для регулирования дефектов существуют стандарты, определяющие наличие тех или иных отклонений.

Согласно ГОСТ 15467-79 дефектами называются отдельные несоответствия продукции установленным требованиям. Дефекты, полученные при литье, можно разделить на пять групп [1, С.187; 2, С.152]:

- несоответствие по геометрической форме;
- дефекты поверхностного слоя;
- несплошности, образующиеся в теле отливки;
- несоответствие по структуре металла;
- наличие неметаллических включений.

Кроме литейных дефектов, в отлитых деталях могут присутствовать и дефекты в изломах [3, С.252]:

- межкристаллитные прослойки (сколы, слоистые изломы);
- обезуглероженный и науглероженный слой;
- черный излом;
- камневидный и нафталинистый излом.

Особый интерес представляет камневидный излом, так как до сих пор нет четкого механизма, объясняющего его происхождение.

Камневидный излом характеризуется четко выраженной однородной поверхностью, по которой происходит разрушение. Обычно разрушение проходит по зернограницным объектам, которые образуются при достаточно высоких температурах. На границах зерен присутствуют ограничено растворимые в аустените фазы, состоящие из мелких частиц или отдельных пленок, образованных из оплавленных эвтектик. Камневидный излом образуется в результате высокотемпературного нагрева, как правило, при температуре около 1200...1250°C [4, С.127].

На поверхности камневидного излома всегда присутствует матовый светло-серый оттенок, с характерным металлическим блеском. Отдельные, четко выраженные камневидные зерна можно выявить в процессе термической обработки.

Камневидный излом, образующийся в литой стали можно разделить на две группы: первичный и вторичный [5, С.160].

Первичный камневидный излом наблюдается в процессе перегрева. Он образуется из-за появления особой грануляционной структуры σ -Fe, которая формируется в процессе кристаллизации при низкой скорости охлаждения в области достаточно высоких температур. Одновременно на границах зерен начинают выделяться ограничено растворимые в γ -фазе карбиды углерода, легирующие элементы, сульфиды и нитриды.

Вторичный камневидный излом образуется в процессе высокотемпературной механической обработки после перегрева металла, такой как свободная или машинная ковка, горячая объемная штамповка, прокатка и т.д.

Рассмотрим механизм, по которому образуется вторичный камневидный излом: при нагреве до температуры 1280...1360°C отдельные зерна аустенита начинают расти и принимают форму многогранника. Затем в этих зернах начинают растворяться карбиды легирующих элементов, цементит, сульфиды и нитриды.

Вредные примеси, такие как азот и сера, на околофазной и межфазной границе образуют особо тонкие пленки сульфидов, способные сохраняться и после охлаждения. Также стоит отметить, что в большинстве случаев камневидный излом наблюдается по границам зерен с тонкими сульфидными пленками. Именно эти факторы влияют на уменьшение ударной вязкости и снижают отдельные механические характеристики.

Камневидный излом наблюдается у деталей, полученных с помощью электродуговой выплавки, а также у деталей после электродуговой выплавки с дальнейшим электрошлаковым переплавом.

Различают устойчивый и неустойчивый камневидный излом. Устойчивый камневидный излом разделяют на излом первого и второго рода.

Рассматривая камневидный излом первого рода, следует отметить, что его можно исправить при нижних температурах фазовых превращений. Но при термической обработке это практически невозможно. Камневидный излом второго рода можно исправить гомогенизационным отжигом или с помощью высокотемпературной нормализации. Но все эти операции достаточно энергозатратны и трудоемки, что сказывается на стоимости конечной продукции.

Проведенные исследования, позволили предположить, что, что на некоторые механизмы образования камневидного излома оказывает влияние наличие редкоземельных металлов, вводимых при выплавке стали. Их вводят в качестве раскислителя при плавке конструкционной легированной стали 35ХГСЛ. Эта сталь чаще всего используется в узлах самолетов, двигателях и других высоконагруженных агрегатах, обладающих повышенной надежностью.

Для подтверждения влияния редкоземельных элементов на камневидный излом было принято решение в часть проводимых плавов добавлять силикокальций СК30.

Силикокальций – это активный комплексный раскислитель, который является дегазатором литейных сталей и литейного чугуна, а также эффективный десульфуратор. Процесс заключается в восстановлении оксида кальция извести кремнием ферросилиция. В таблице 1 представлен химический состав силикокальция СК30.

Таблица 1 – Химический состав СК30

Массовая доля, %				
Ca	Si	Al	C	P
не менее		не более		
30	50	2,0	0,5	0,02

В данном исследовании рассматривались 36 плавов: 26 плавов, где раскислителем являлся алюминий А199, добавленный по 160 г. в каждую плавку, и 10 плавов, где использовался силикокальций СК30, добавленный в каждую плавку также по 160 г. [6,С.10].

В таблице 2 приведены, какие плавки исследовались, и в каких плавках был обнаружен камневидный излом.

Таблица 2 – Наличие камневидного излома в плавках стали в зависимости от вида раскислителя: А199 и СК 30

Раскислитель А199	Раскислитель СК 30
Камневидный излом не обнаружен	
19, 22, 23, 24, 40, 41, 47, 49, 51, 52, 53	25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 54
Камневидный излом обнаружен	
20, 21, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 50	-

Для исследования влияния микролегирования на наличие камневидного излома были отобраны 5 плавков: 27, 33, 34, 35, 44, как с камневидным изломом, так и без него. В таблицах 3, 4 представлены химический состав и механические свойства данных образцов. На рисунках 1-5 изображены изломы образцов данных плавков.



Рисунок 1 – Излом плавки № 27 из стали 35ХГСЛ (раскислитель СК30)

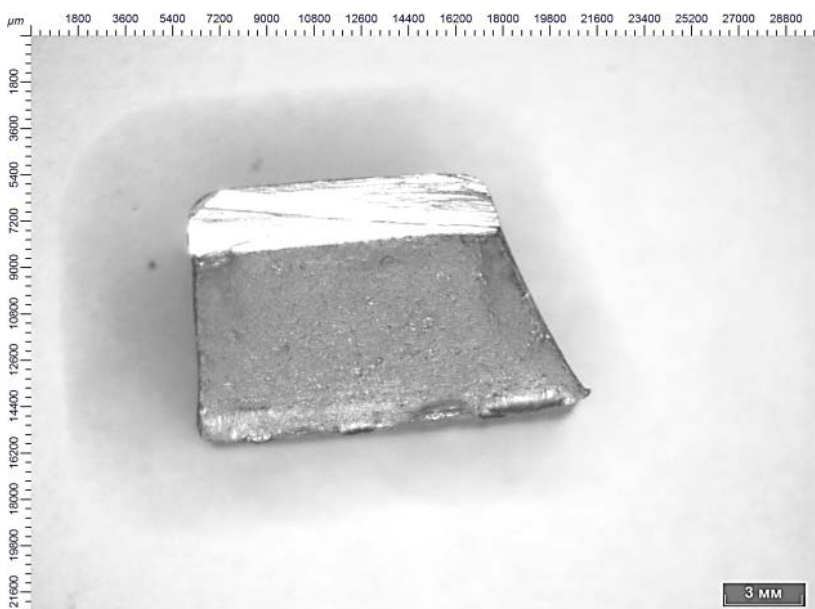


Рисунок 2 – Излом плавки № 33 из стали 35ХГСЛ (раскислитель СК30)

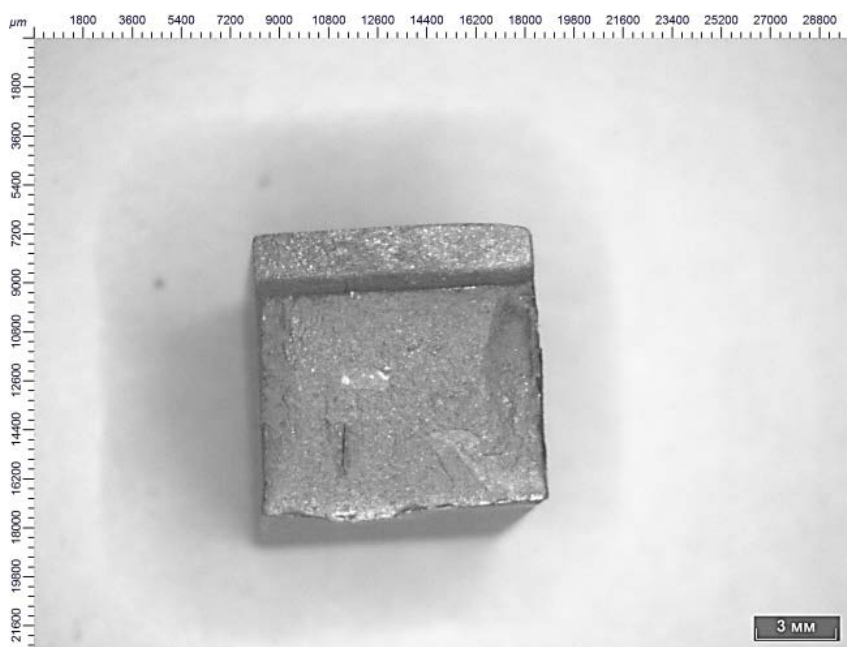


Рисунок 3 – Излом плавки № 34 из стали 35ХГСЛ (раскислитель А199)

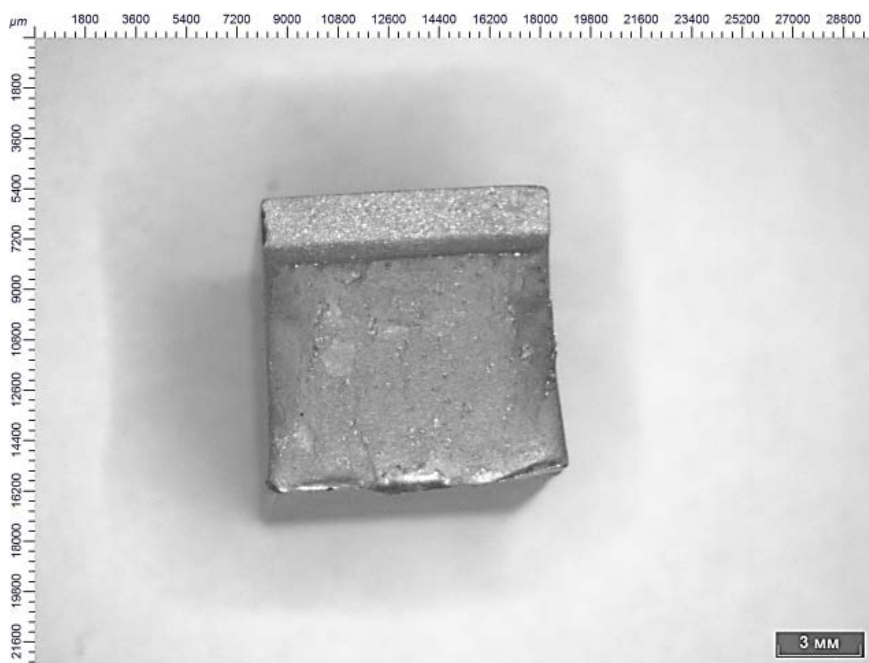


Рисунок 4 – Излом плавки № 35 из стали 35ХГСЛ (раскислитель А199)

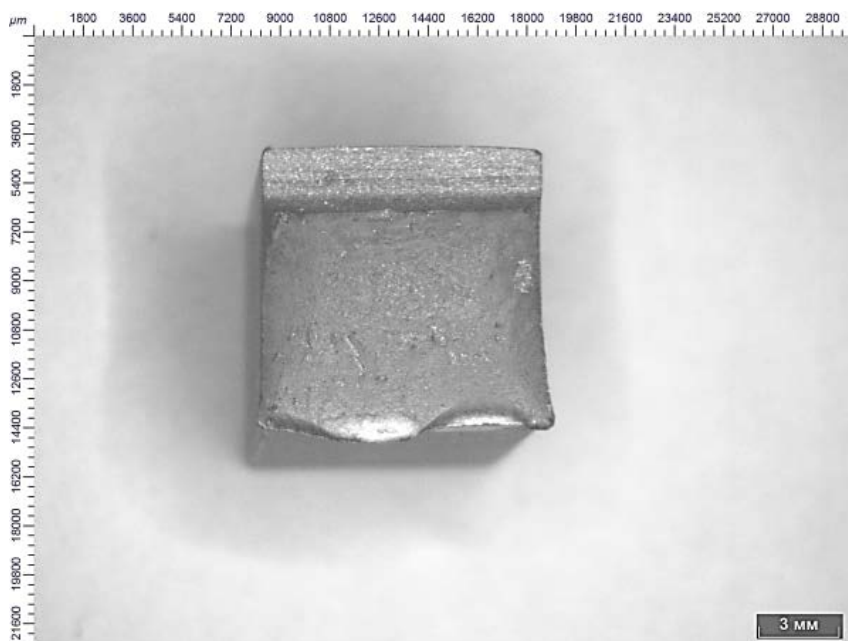


Рисунок 5 – Излом плавки № 44 из стали 35ХГСЛ (раскислитель А199)

В таблице 3 приведен элементарный химический состав сталей различных плавков стали 35ХГСЛ. Состав определялся с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-720P/800P.

Таблица 3 – Химический состав образцов

№ плавки	Химические элементы, %					
	C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni
27	0,36	1,13	0,87	0,85	0,16	0,14
33	0,34	1,08	0,82	0,82	0,14	0,19
34	0,36	1,20	1,10	0,80	0,17	0,32
35	0,37	1,22	1,10	0,79	0,18	0,32
44	0,36	1,19	0,91	0,76	0,16	0,22

Из таблицы 3 видно, что плавки 34 и 35 содержат превышающее норму содержание хрома, что, возможно, способствовало появлению камневидного излома, но в плавке 44 все элементы находятся в пределах, но камневидный излом все же присутствует.

Таблица 4 – Механические свойства образцов из стали 35ХГСЛ

№ плавки	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	НВ
требуемые свойства	≥ 1000	≥ 9	≥ 25	≥ 3	277...331
27	1059	14,0	43,7	6,5	302
33	1010	15,0	29,5	7,2	321
34	1068	14,0	46,7	4,5	311
35	1059	14,0	39,2	6,2	231
44	1068	13,0	32,7	6,5	311

Механические свойства выбранных образцов удовлетворяют требованиям ОСТ 1 90093-82 [6,С.8; 7,С.22].

Микроструктуры после окончательной термической обработки (рис. 6 – рис. 10) практически не отличалась между удовлетворительными и забракованными образцами, но наблюдался игольчатый сорбит на плавке № 27 (рис. 6) и на плавке № 33 (рис. 8).

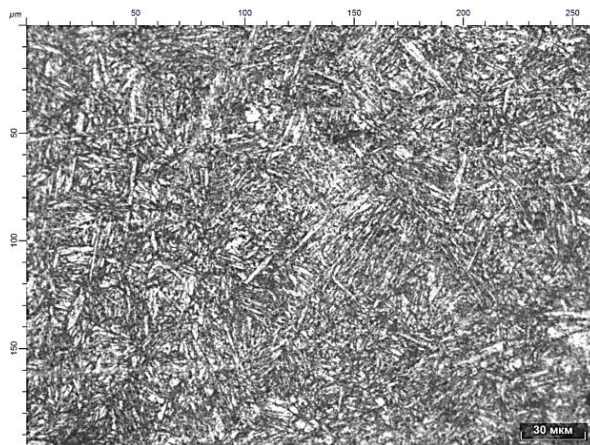


Рисунок 6 – Микроструктура стали 35ХГСЛ (плавка № 27) после окончательной термической обработки

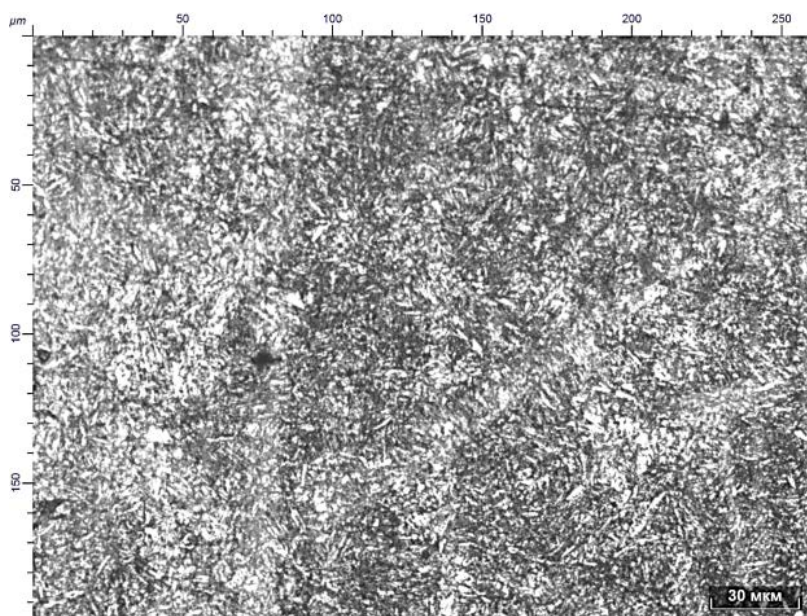


Рисунок 7 – Микроструктура стали 35ХГСЛ (плавка № 33) после окончательной термической обработки

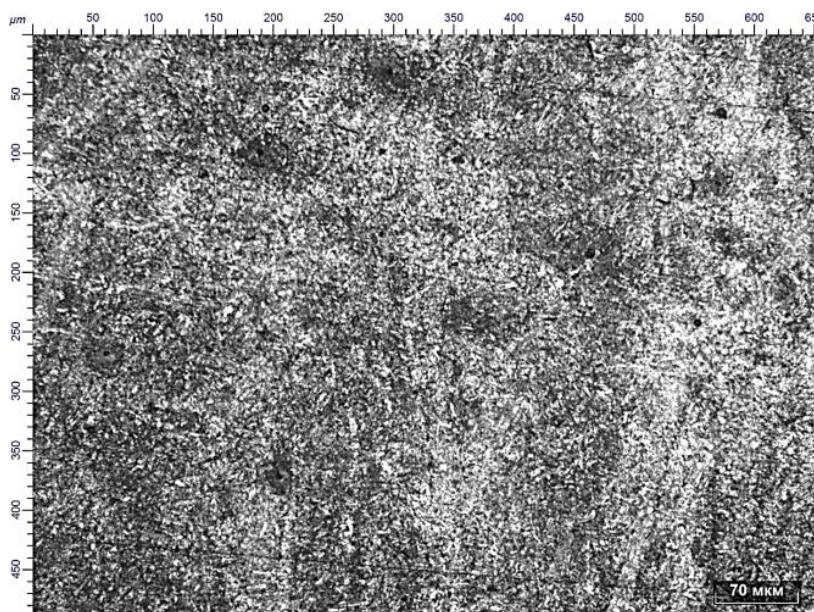


Рисунок 8 – Микроструктура стали 35ХГСЛ (плавка № 33) после окончательной термической обработки с четко выделенными зернами сорбита

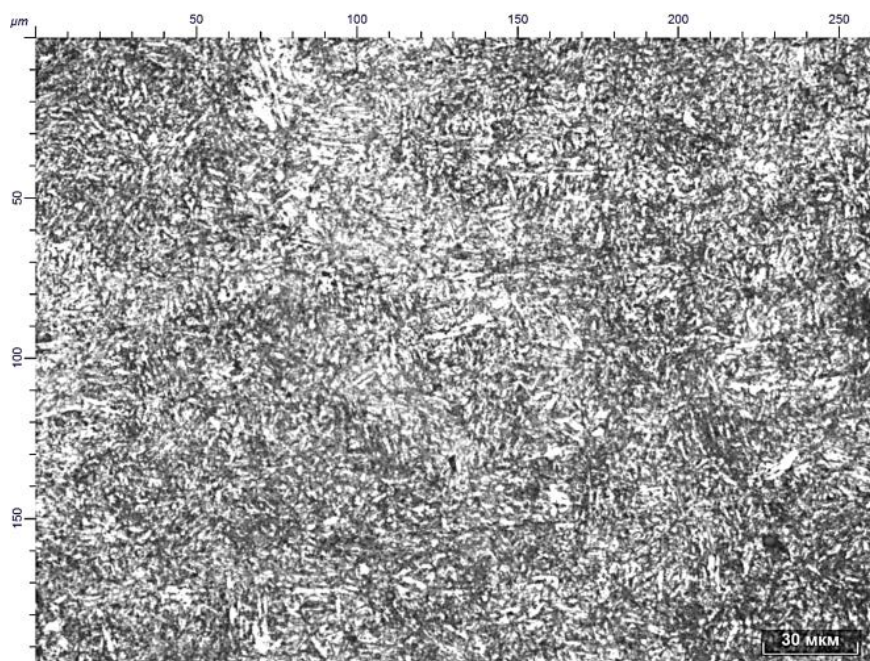


Рисунок 9 – Микроструктура стали 35ХГСЛ (плавка № 34) после окончательной термической обработки

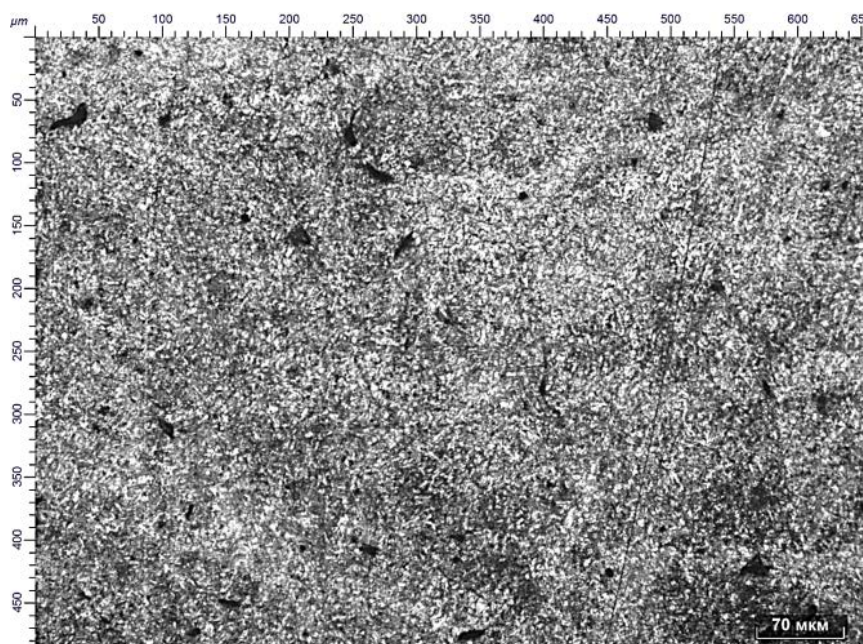


Рисунок 10 – Микроструктура стали 35ХГСЛ (плавка № 35) после окончательной термической обработки

Рассматривая в качестве модификатора силикокальций СК30 с повышенным содержанием кальция и кремния, можно отметить полное отсутствие камне-

видного излома у плавок с его добавлением. СК30 относится к ферросплавам, хотя железо в нем содержится лишь в виде примеси, составляющей не более 5% от общей массы. Основное применение – в качестве раскислителя. В целом силико-кальций СК30 повышает твердость стали и ее стойкость к коррозии. Ферросплав содержит в своем составе до 30% кальция, но до 10...15 % кальция может быть представлено в форме комплексных и простых оксидов, что приводит к нестабильному усвоению элемента. Также СК30 способствует предотвращению появления камневидного излома, но всех закономерностей появления камневидного излома в отливках из стали не выявлено.

Литература

1. Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И., Евлампиев А.А. Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления: Учебное пособие // М.: Машиностроение, 2008. 282с.
2. Новоклещева С.М., Виноград М.И. Дефекты стали // М: Metallurgy, 1984. 199 с.
3. Гаранин В.Ф., Иванов В.Н., Казеннов С.А. Литье по выплавляемым моделям // М.: Машиностроение, 1994. 448 с.
4. Герасимова Л.П., Ершов А.А. Изломы конструкционных сталей // М: Metallurgy, 1987. 272 с.
5. Скрябин М.Л., Чухлова С.С. Исследование влияния тонких нитридных пленок алюминия на камневидный излом литой стали // Информационно-технологический вестник, 2018. № 3 (17). С. 158-163.
6. ОСТ 1 90093-82. Отливки фасонные из конструкционной легированной стали. 1982. 13 с.
7. КТТП литья № 047. Приготовление сплава 35ХГСЛ и заливка его в формы // АО «ВМП «АВИТЕК», 2004. 39 с.

УДК 678.021:004.94

Моделирование плетеных структур двойной кривизны

А.В. Чесноков, доктор технических наук, зав. лабораторией,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,
И.А. Тимофеев, кандидат технических наук, зав отделом,
Ф.А. Грачев, инженер-технолог,
АО «Композит», г. Королев, Московская область

В работе обоснована необходимость моделирования плетеных структур двойной кривизны, и приведены результаты разработки модели плетеной структуры слоев на изменяющейся форме сечения оправки вдоль оси с пространственной кривизной. Разработанный математический аппарат моделирования плетеных структур встроен в созданное программное обеспечение. Приведены результаты построения моделей плетеных структур. Для возможности получить плетеные структуры с двойной кривизной проведена модернизация плетельной оснастки. Применение разработанной технологии позволит перейти на новый уровень управления свойствами и формой изделий, повысить интегрированность конструкций, сократить трудоемкость изготовления деталей, снизить вес конструкций в целом.

Композиционные материалы, плетение, плетельная машина, модель плетеной структуры, контурное плетение, преформа.

Simulation of plain structures of spatial curvature

A.V. Chesnokov, Doctor of Technical Sciences head of laboratory,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,
I.A. Timofeev, Ph.D. Head of Department,
F.A. Grachev, engineer-technologist,
JSC «Kompozit», Korolev, Moscow region

The article substantiates the necessity of modeling double-curved woven structures and presents the results of the development of the woven structure model of layers on the varying shape of the cross-section of the mandrel along the axis with spatial curvature. The developed mathematical apparatus for modeling woven structures is built into the created software. The results of building models of woven structures are presented. To make it possible to obtain woven structures with double curvature, the plaque was upgraded. The application of the developed technology will allow us to move to a new level of managing the properties and form of products, improve the integration of structures, reduce the laboriousness of manufacturing parts, and reduce the weight of structures as a whole.

Composite materials, weaving, weaving machine, woven structure model, contour weaving, preform.

В настоящее время прогресс в аэрокосмической отрасли не возможен без широкого применения новых конструкционных материалов. В связи с постоянно растущими требованиями по улучшению прочностных характеристик и снижению массы конструкций, широкое применение получили различные композиционные материалы (КМ). Большие возможности современной технологии, широкий спектр армирующих волокон и связующих позволяют создать конструкции космических аппаратов с уникальными свойствами, обладающими недостижимыми еще несколько лет назад характеристиками по весовой эффективности и размеростабильности в широком диапазоне температур [1].

Однако, композиционные материалы, изготовленные с большой долей привлечения ручного труда (ручное формование), уже не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к конструкциям в аэрокосмической отрасли. Недостатком такой формы организации производственных процессов является низкая производительность, высокая доля брака, дороговизна и низкая повторяемость свойств [2-5].

Решением данной проблемы может стать – использование автоматизированных методов изготовления КМ или автоматизация существующих технологий, которые, по сравнению с ручным трудом позволяют существенно повысить степень повторяемости свойств изготавливаемых деталей из КМ, снизить количество брака, увеличить производительность.

Один из таких методов, позволяющих существенно автоматизировать процесс изготовления КМ это – технология контурного плетения армированных преформ [3].

Однако, несмотря на ряд существенных преимуществ таких как: высокая производительность, высокая степень повторяемости свойств, простота в применении, при попытке оплетения оснастки с двойной кривизной, возникают определенные трудности по обеспечению однородности свойств плетеной преформы на всей ее протяженности. К таким проблемам можно отнести – изменение плотности слоя, изменения схемы армирования [6-8]. Моделирование плетеных преформ, взаимосвязи технологических параметров и получаемых изделий является неотъемлемой частью перехода к индустрии 4.0 [9].

Актуальность данной темы обусловлена необходимостью разработки программного обеспечения для сокращения трудоемкости подготовки производства и контроля технологического процесса, освоения производства изделий с изменяющейся формой сечения вдоль оси с пространственной кривизной.

В Инжиниринговом центре Технологического университета проведена модернизация имеющейся радиально-плетельной машины РП64-1-130 (рис. 1), которая повысила количество программно-управляемых перемещений формообразующей оснастки в процессе плетения, что дало возможность изготавливать преформы с пространственной осью с заданными параметрами слоев. Создана возможность изготавливать преформы с заданным изменением параметров оплетенного слоя на поверхности формообразующей оснастки. Для прогнозирования и контроля свойств преформы, расчета технологических параметров необходимо

специальное программное обеспечение (ПО).

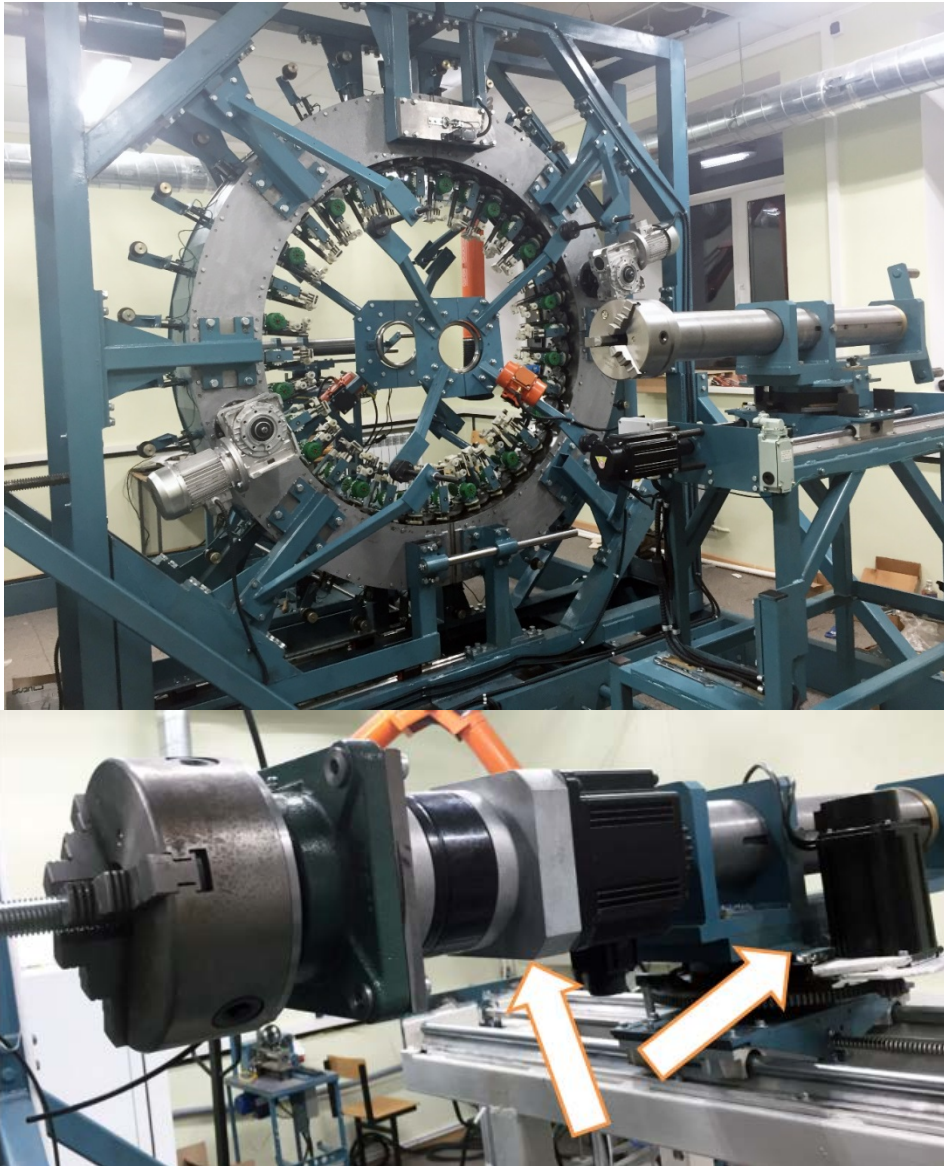


Рисунок 1 – Общий вид плетельной машины РР64-1-130 и модернизированный узел

На основании требований к качеству преформ и технологическому процессу плетения сформированы требования к ПО:

- ПО должно предоставлять возможность изменять параметры нити, т.к. сечение нити в преформе зависит от исходного состояния и параметров переплетения;
- ПО должно генерировать 3D модель получаемой преформы;
- ПО должно иметь возможность изменения параметров радиально пле-

тельного оборудования;

- ПО должно иметь возможность работать с преформами переменного сечения вдоль криволинейной оси;

- ПО должно быть с открытым кодом для возможности внесения изменений, интеграции с ПО машинного зрения и прочностного анализа.

В работе [10] приведен анализ развития методов моделирования плетеных структур, за почти тридцатилетний период вводились различные допущения и уточнения расчетных моделей, разрабатывались программы, в которые были заложены эти модели для решения конкретных задач. Более универсальное программное обеспечение разработано в партнёрстве с производителями плетельного оборудования и базируется на его возможностях и подходах к реализации технологических перемещений. Распространенным и достаточно универсальным ПО для моделирования процесса плетения является Composites Braiding Designer в CATIA Design/Engineering [11], TexMind Braider [12], LS-DYNA [13].

ПО Composites Braiding Designer позволяет проектировать детали из композитных материалов, получаемые контурным плетением, отображать траектории волокон на сложных поверхностях преформ, оптимизировать технологические параметры плетения и оправки для приближения прогнозируемой ориентации волокон в преформе к заданным. По результатам моделирования подготавливается информация для управляющей программы робота, обеспечивающего перемещение оправки в процессе плетения.

ПО TexMind Braider разработано для визуализации и структурного анализа прямолинейных трубчатых и плоских изделий постоянного сечения. Встроенный конструктор плетельных машин позволяет легко смоделировать различные кинематические схемы оборудования и проанализировать получаемые преформы.

ПО LS-DYNA позволяет смоделировать сложную плетеную структуру, встроенный алгоритм расчета взаимодействия оплеточных жгутов позволяет рассчитать натяжение и деформации жгутов на различных участках преформы.

Перечисленное ПО является коммерческим и не позволяет вносить изменения и дополнения программного кода. Поэтому все больше публикаций о разработке ПО для моделирования плетеных структур предназначенных для решения специальных задач исследователей. Авторы используют различные подходы к расчету траекторий и моделированию преформ [10], для получения 3D модели преформы все чаще применяют универсальные CAD программы [14].

Инжиниринговым центром Технологического университета разработано ПО моделирования процесса плетения для решения целого ряда текущих и перспективных задач:

- анализа параметров плетеной структуры на этапе проектирования преформ (объемная доля наполнения плетеного слоя волокнами и углы армирования в различных сечениях преформы);

- осуществление контроля оператором преформ в процессе плетения по трехмерной модели и таблице углов армирования;

- помощь при разработке управляющих программ для плетельного оборудования. Определение координат смещения оснастки в процессе плетения и скоростей смещения для обеспечения заданных параметров плетения (угол армирования или поверхностная плотность);

ПО должно стать основой для решения перспективных задач:

- контроль процесса плетения с использованием средств машинного зрения и программного сравнения с эталонной моделью преформы (полученной моделированием);
- осуществление динамического контроля процесса плетения и автоматизированная корректировка технологических параметров;
- проведение прочностного анализа изделия на основе смоделированной преформы с учетом углов укладки нити в каждой элементарной ячейке.

Разработанный математический аппарат расчета траекторий жгутов для возможности практического применения и наглядности результата моделирования был реализован в виде библиотеки для программы Компас-3D v.17.1.

На начальном этапе моделирования задается количество наплетаемых слоев с указанием параметров слоев. Параметрами слоя является: структура слоя (биаксальная, триаксальная), принцип построения слоя (задан угол армирования, поверхностная плотность слоя или скорость движения оправки), количество оплеточных веретен, форма представления поперечного сечения жгутов (прямоугольник или эллипс) с указанием геометрических параметров. На последующих этапах моделирования возможно нанесение новых слоев с другими параметрами или перейти к анализу полученных моделей плетеных слоев. Количество слоев в модели не ограничено. Слои могут иметь различные параметры.

Моделирование оплеточных слоев выполняется по трехмерной модели оправки, загружаемой до начала моделирования. На примере оправки построенной перемещением окружности по заданной траектории с большими углами поворота оси показано построение плетеного слоя. На рисунке 2 показана преформа с двумя триаксальными слоями жгута круглого сечения с разных углов обзора для наглядности.

Приведенный пример демонстрирует качественную модель преформы. На преформе видно характерное изменение поверхностной плотности жгутов в местах изгиба в виде разного расстояния между жгутами на внутренней и внешней стороне изогнутого участка.

В качестве примера моделирования преформы переменного сечения построена комплексная модель оправки, содержащая комбинацию различных сечений и пространственную ось. Поверхность оправки построена в Компасе с применением инструмента построения «По сечениям». Результат моделирования оплеточных слоев при заданном угле армирования 60° представлен на рисунке 3. Модель плетеного слоя точно отображает укладку плетеного слоя на различных поверхностях модели, в месте сильного изгиба оси видно изменение наполнения слоя волокном на внутренней и наружной поверхности.

На рисунке 4 приведены разрезы преформы для демонстрации качества моделирования вдоль и перпендикулярно жгуту.

На рисунке 5 показана возможность выделения скелетных жгутов разными цветами для наглядности при проведении анализа получаемых преформ. Встроенный блок анализа позволяет наглядно, в виде таблицы или графиков, представить расчеты плотности укладки жгутов, углов армирования и скорости движения оправки. Примеры результатов расчета для преформы рисунка 5 представлены на рисунке 6. Полученные результаты удобно использовать в интерфейсном блоке,

позволяющем строить графики и сопоставлять данные по сечениям.



Рисунок 2 – Модель преформы с двумя триаксиальными слоями

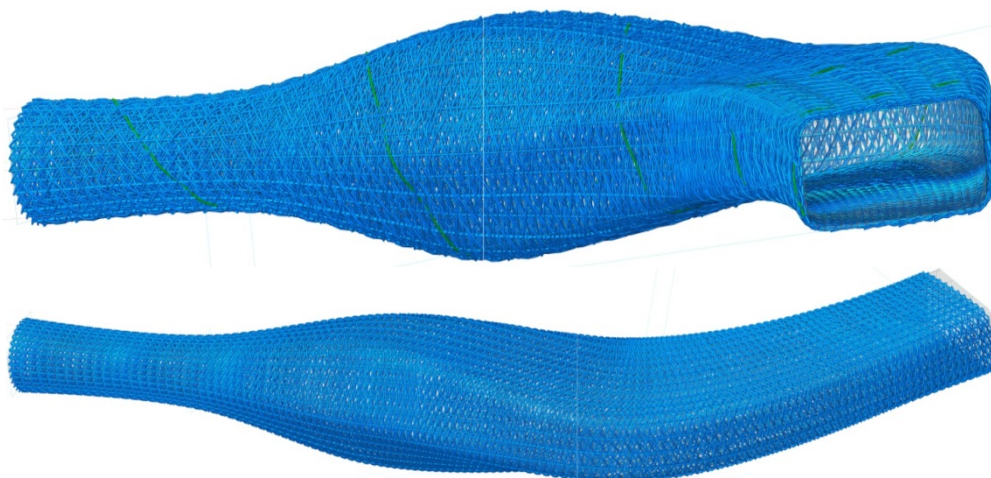


Рисунок 3 – Модель плетеного слоя на комплексной оправке

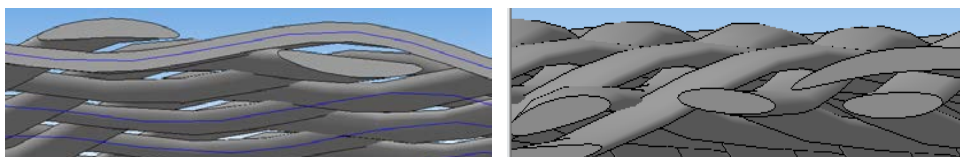


Рисунок 4 – Модели слоя в разрезе

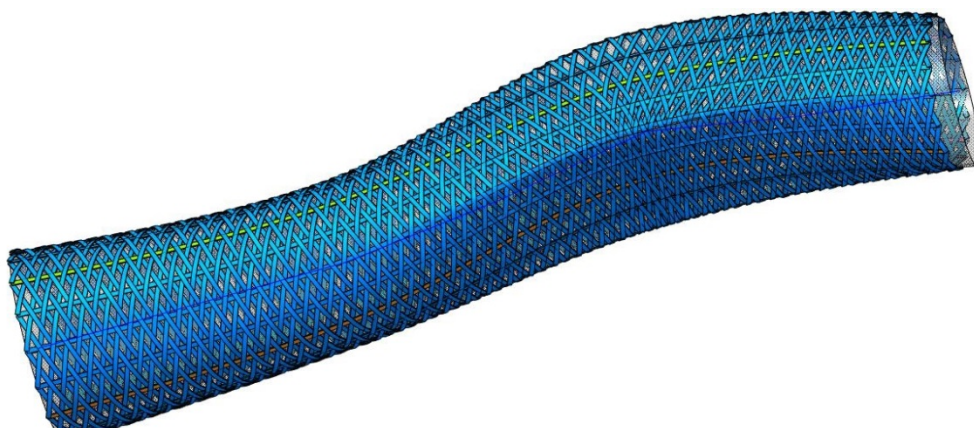


Рисунок 5 – Пример выделения скелетных нитей

Расчетным блоком определяется траектория и скорости движения оправки, что позволяет сократить трудоемкость составления управляющих программ для оплетения оснастки.

Разработанное ПО апробировано на формообразующих оснастках с двойной кривизной и изменяющейся формой сечения с заданными параметрами плетеных слоев.

ПО дополнительно было апробировано при расчете крупногабаритных конусообразных преформ, к качеству плетеных слоев предъявлялись требования максимального и равного объемного наполнения волокном. Необходимо отметить, что плотность плетеного слоя на прямую влияет на пористость будущего КМ и его физико-механические свойства. Результаты изготовления преформ по рассчитанным программам представлены на рисунке 7.

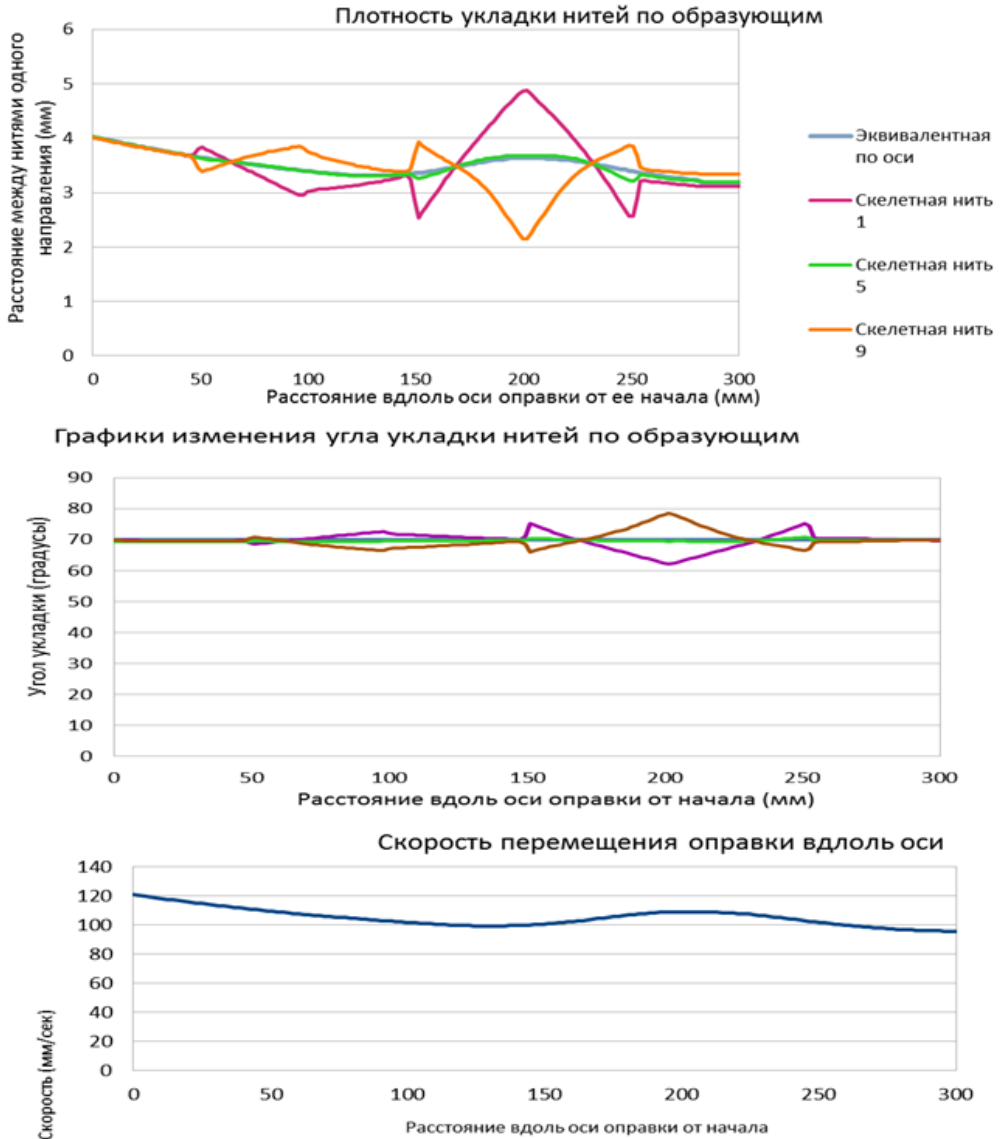


Рисунок 6 – Графики параметров плетеного слоя



Рисунок 7 – Плетеные преформы изготовленные с постоянной поверхностной плотностью

Таким образом можно сделать выводы что: выполненная модернизация плетельного оборудования и разработанное ПО моделирования и анализа преформ двойной кривизны позволяют сократить длительность и трудоемкость подготовки производства сложных преформ. Например, пространственные патрубки, пространственные профильные силовые элементы конструкций, стрингеры, шпангоуты и другие элементы ферменных конструкций для летательных и космических аппаратов.

Разработанное ПО обеспечивает возможность перехода к разработке новых модулей машинного контроля и документирования процесса плетения, прочностного анализа изделий, на основе смоделированных плетеных преформ.

Работа выполнена по гранту Правительства Московской области в сферах науки, технологий, техники и инноваций, по теме «Разработка автоматизированной системы перемещения оправки при контурном плетении изделий двойной кривизны и разработка программного обеспечения управления плетельной оснасткой»

Литература

1. Дудченко А.А., Лурье С.А., Соляев Ю.О., Жаворонок С.И., Халиулин В.И., Батраков В.В. Расчет, проектирование и технология изготовления термостабильного композитного стержня // Конструкции из композиционных материалов, 2016. № 1 (141). С 3-11.
2. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии, 2017. № 8. С. 264-271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-8-264-271.
3. Самипур С.А., Халиулин В.И., Батраков В.В. Разработка технологии изготовления композитных трубчатых элементов авиакосмического назначения методом радиального плетения // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2018. № 3. С. 90–95.

4. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ //Авиационные материалы и технологии, 2013. № 1. С. 35–39.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии, 2012. № 5. С. 7–17.
6. Самипур С.А., Халиулин В.И., Батраков В.В. Методика расчета параметров процесса подготовки преформы радиальным плетением // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2017. № 3. С. 89–95.
7. Braiding Technology for Textiles. Y. Kyosev. 392 p.
8. Самипур С.А., Батраков В.В., Халиулин В.И. Расчетно-экспериментальная методика обеспечения точности угла армирования преформы, изготовленной методом радиального плетения // Вестник машиностроения, 2018. № 6.
9. Böhler, Patrick & Dittmann, Jörg & Michaelis, Daniel & Middendorf, Peter. (2016). Process Simulation as Part of Industry 4.0. Lightweight Design. 9. 6-11. 10.1007/s35725-016-0070-4.
10. Ning, F., O Hear, N., Zhou, R., Shi, C., & Ning, X. (2017). Modeling of Braided Structures Based on Secondary Helix. Narrow and Smart Textiles, 91–107. doi:10.1007/978-3-319-69050-6_9
11. CATIA 3DEXPERIENCE R2015X Совершенствование продуктов. URL: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/produkty/3dexperience/novye-vozmozhnosti-r2015x/> (дата обращения: 19.09.2018).
12. Braider. URL: / <http://texmind.com/wp/products/braider/> (дата обращения: 19.09.2018).
13. Simulation of the Braiding Process in LS-DYNA // 15th International LS-DYNA® Users Conference. Composites. June 10-12, 2018.
14. Fanggang, N., & Weidong, Y. (2016). Geometrical Modeling of Tubular Braided Structures Overbraiding Polygonal Prism Based on the Intersection of Surfaces. Recent Developments in Braiding and Narrow Weaving, 33–45. doi:10.1007/978-3-319-29932-7_4.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 20.09.2019
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,2
Тираж 500 экз.
Заказ № 75-18
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail :keyneslab@gmail.com
Site:www.n-ko.ru