

подкрепляющих это мировоззрение тем, говорило беспочвенное предложение о том, будто экономически никак не рентабельно, т.к. и само производство никак не из дешевых, правда и, не считая такого, для работы будет нужно электричество. Эти заявления воспрещается элементарно пренебрегать. Напротив, раз есть данные сомнения то они должны существовать либо признаны, либо обоснованно опровергнуты. Ничего никак не имеет возможность делать наилучшим опровержением, нежели четкие количества, при данном количестве, позволяющие хоть какому хотящему без помощи других исполнить их тест и изготовить личные выводы. Свергаемые в настоящей статье смысла и суждения должны стать такой убедительной основой.

Действенность рекуператоров тепла вентиляционного воздуха исходя из убеждений энергосбережения разбирается 2-мя параметрами (а точнее, их соответствием) - степенью энергосбережения рекуператора и его удельным энергопотреблением. Далее станет дана количественная критика ступени рекуперации (энергосбережения) созданных нами рекуператоров, а еще приведены абсолютные смысла, описывающие численность сбереженной энергии на нескольких режимах.

Нужно обратить интерес на то, будто 1-ая из данных величин (степень энергосбережения) разносторонне установлена терминологически, а две они никак не имеют фиксированного смысла для предоставленного рекуператора и меняются в совсем широких мерах в зависимости от пропорции температур наружного и внутреннего воздуха.

УДК 658.562

АРХИТЕКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АНОДНО-ОКИСНЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ И ЕГО СПЛАВАХ

Ефремов А.Н.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1730

АННОТАЦИЯ

В работе описана методология модельно-ориентированного системного инжиниринга и ее приложение для проектирования моделей сложных искусственных технических систем. Применение методов продемонстрировано на примере создания архитектуры математической модели прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах, полученного гальваническим способом в серноокислом электролите. Показано, что за счет универсализма и простоты алгоритмизации и цифровизации методы модельно-ориентированного системного инжиниринга позволяют переходить к созданию цифровых двойников разрабатываемых технических систем.

Ключевые слова: прогнозирование качества, системный инжиниринг, архитектурные модели, математическая модель, гальваническое производство, цифровой двойник

При запуске нового оборудования и модернизации действующего производства для повышения качества выпускаемой продукции встает вопрос об адаптации существующих технологий нанесения покрытий к новым условиям производства. В производственных условиях подобрать рациональные и экономичные режимы нанесения покрытий достаточно сложно и экономически неоправданно, поэтому разработка адекватной математической модели

Литературы

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Passive House: The Standard and Technical Overview [Electronic resource]// CIAT. – Mode of access: <http://www.ciat.org.uk/>
3. Jounal R., Eriksen K. E. Active House Alliance [Electronic resource] // Activehouse.info. – Mode of access: <http://www.activehouse.info/>
4. Elgan M. A smart home that's really smart [Electronic resource] // Computerworld.com. – Mode of access: <http://www.computerworld.com/>
5. Агитаев Е. Эффект глобального потепления *Электронный ресурс+ // Центральная профсоюзная еженедельная газета «Солидарность». – Режим доступа: <http://www.solidarnost.org/>
6. Булгаков С.Н. Энергоэффективные строительные системы и технологии *Электронный ресурс+ // Электронный журнал АВОК. – Режим доступа: <https://www.abok.ru/>
7. Система рекуперации тепла *Электронный ресурс+ // Null-dom.ru. – Режим доступа: <http://null-dom.ru/>
8. Дискин М.Е. Эффективность рекуперации теплоты в системах вентиляции при температурах наружного воздуха ниже температуры опасности обмерзания *Электронный ресурс+ // I-Mikro.ru. – Режим доступа <http://i-mikro.ru/>

прогнозирования качества покрытий для различных условий производства, а в дальнейшем и «цифрового двойника» (далее – ЦД) производственной линии, является целесообразным при выборе технологических режимов. Создание такой модели позволит снизить затраты на этапах подготовки производства и эксплуатации, а также свести к минимуму риски, связанные с появлением бракованной продукции.

Одним из важнейших технологических процессов в ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» является процесс нанесения защитных антикоррозионных покрытий гальваническим способом, в том числе и анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах. Он является критическим процессом в контексте удовлетворенности потребителей. Кроме того, в настоящее время не удается снизить количество несоответствий по данному параметру, что приводит к излишним затратам. Это дает основание утверждать, что разработка адекватной модели операции и применение статистических методов в управлении качеством продукции позволят существенно снизить внутренние потери, оптимизировать производственные процессы.

Одной из современных методологий системной инженерии, которая позволит создать

успешную математическую модель, комплексно учитывающую все основные показатели качества покрытий, регламентированных стандартами качества в конкретных технологических условиях, является модельно-ориентированный системный инжиниринг MBSE (Model-based Systems Engineering) [1-4].

Для моделирования сложных систем могут последовательно применяться несколько нотаций моделирования, рассматриваемых как страты моделирования. Взаимосвязь моделей различных нотаций обеспечивается посредством использования единой политики стратификации и представления моделей. Удобным является применение опорной стратификации моделей по «принципу матрешки» – от более общих представлений к более детальным (рис. 1) [5].

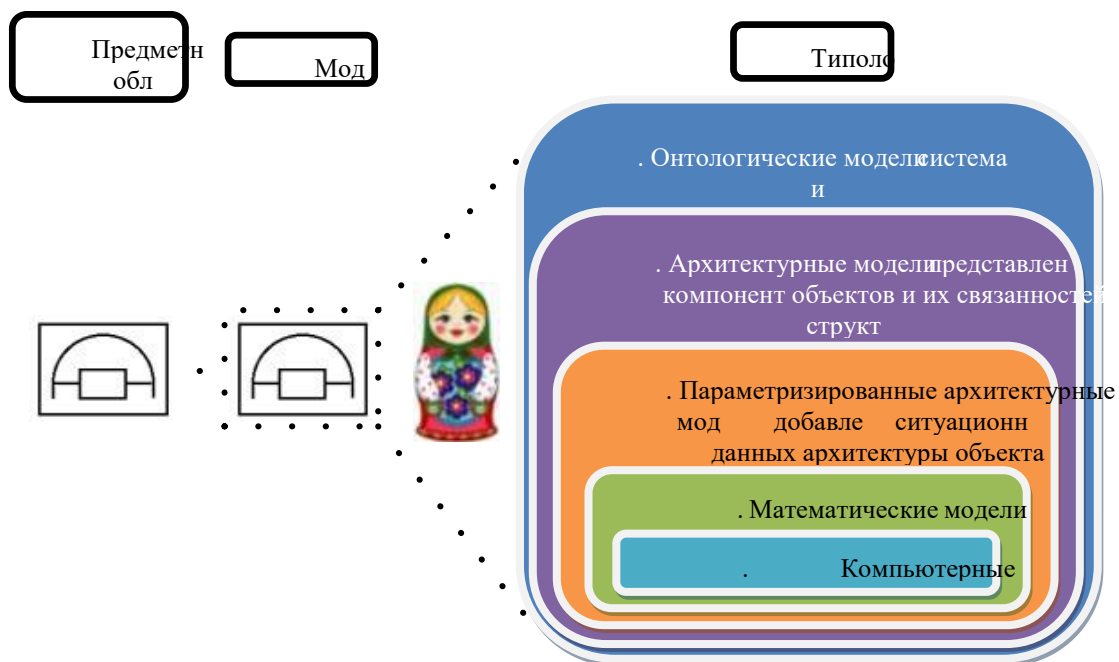


Рисунок 1 – Опорные нотации моделирования систем [5]

Традиционно системное моделирование начинается с построения онтологии – задания терминов и понятий предметной области и целевой системы [5]. На данном этапе проводится выделение предметной области и способ ее представления, описание моделируемой системы, дифференциация разрабатываемого продукта и системы деятельности по его созданию.

Следующим шагом является построение архитектурных моделей, которые задают структурные описания. Архитектурная модель отображает структурное устройство системы, выделяя и описывая сущности и компоненты системы в их связанности.

В дальнейшем дополнение архитектурных моделей существенными для рассмотрения качественными и количественными параметрами приводит к формированию параметризованных архитектурных моделей.

Рассмотрим использование данной методологии на примере создания математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.

1. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Из известных способов защиты алюминия и его сплавов от коррозии наиболее распространено оксидирование. Оксидированные детали не только обладают повышенной коррозионной стойкостью, но и приобретают ряд ценных физико-химических свойств – износостойкость, твердость, удельного сопротивления и др. [6-10].

Формирование оксидного слоя на поверхности алюминия и его сплавов осуществляют химическим или электрохимическим (анодным) оксидированием. В зависимости от метода и условий обработки можно получать покрытия различной толщины и структуры, акцентируясь на том свойстве оксида, которое необходимо в

процессе эксплуатации изделия. Химическое оксидирование дает покрытия небольшой толщины (порядка 3-5 мкм), которые предназначены для защиты от коррозии в легких условиях или как промежуточный подслои для адгезии лакокрасочного покрытия. Анодным оксидированием можно получать покрытия большей толщины, способные противостоять как коррозии в более жестких условиях, так и износу и прожодению электрического тока [6, 11-14].

Наиболее распространенным способом обработки алюминия и его сплавов является анодное оксидирование. Это общедоступный и сравнительно дешевый вид обработки деталей из алюминия и его сплавов, позволяющий в большинстве случаев эффективно решать задачи модификации поверхности с целью придания ей требуемых декоративности, коррозионных и физико-механических характеристик [6].

Технологический процесс оксидирования алюминия и его сплавов может включать в себя: подготовительные операции, собственно

оксидирование и заключительную обработку полученной оксидной пленки. После каждого вида обработки предусмотрена межоперационная промывка [6, 7, 15, 16].

В настоящей работе объектом исследования является технология нанесения анодноокисных покрытий на алюминии и его сплавах в ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург». Поэтому в качестве системы систем выступает математическая модель гальванической линии анодирования, которая имитирует полный пооперационный цикл процесса нанесения анодно-окисного покрытия на детали из алюминия и его сплавов.

В качестве «продукта» исследования рассматривается математическая модель прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, являющаяся составной частью математической модели гальванической линии анодирования – подсистемой системы систем (рис. 2).

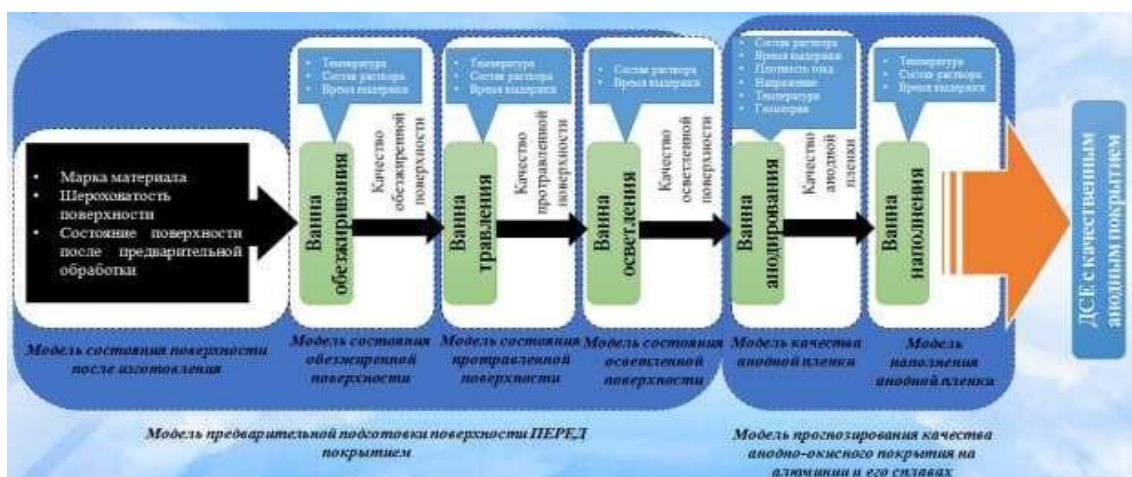


Рисунок 2 – Облик математической модели гальванической линии анодирования алюминия и его сплавов

Выделив в системе систем исследуемую онтологической модели рассмотрим особенности подсистему – обобщенный продукт, для полноты обобщенного продукта (таблица 1).

Таблица 1

Основные особенности обобщенного продукта

НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	Математическая модель прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах (далее – ММПК АОП).
ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ ПРОДУКТА	1. Предсказывать возможные несоответствия анодно-окисных покрытий во время течения технологического процесса. 2. Подсказывать, когда необходима корректировка электролита по основным компонентам без проведения химического анализа. 3. Прогнозировать основные показатели качества покрытия. 4. Прогнозировать оптимальные технологические параметры ведения технологического процесса.
ЦЕННОСТЬ ПРОДУКТА	Возможность контролировать и управлять основными показателями качества покрытия во время технологического процесса, сводя к минимуму или исключая полностью появление несоответствий (брака).

<p style="text-align: center;">КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПРОДУКТА</p>	<p>Модель прогнозирования структурных свойств (внешний вид, толщина, прочность сцепления, пористость, качество наполнения).</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Модель прогнозирования защитных свойств (коррозионная устойчивость). 2. Модель прогнозирования функциональных свойств (удельное сопротивление, пробивное напряжение, качество адгезии). 3. Модель прогнозирования механических свойств (твердость, износостойкость) 4.
<p style="text-align: center;">МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ</p>	<p>Семь инструментов качества (контрольные карты, диаграмма Парето, а) диаграмма рассеивания, причинно-следственная диаграмма Исикавы и б) др.).</p> <p>Методы статистического анализа</p> <p>с) Методы контроля качества покрытий (согласно ГОСТ 9.302)</p> <p>д) Методы математического моделирования</p>

Для полноты опорной архитектурной модели необходимо произвести учет факторов внешней среды. Основными воздействующими факторами на нашу систему будут являться:

- Климатические условия окружающей среды, которые влияют на материальный и тепловой балансы гальванической линии анодирования (температура, влажность и давление внутри цеха);

- Человеческий фактор (ошибки оператора при выполнении операций в процессе анодирования, зависящие от квалификации оператора (гальваника), его ответственности при выполнении требований технологического процесса и его морально-физического состояния);

- Техническое состояние вспомогательного оборудования линии анодирования - исправность и точность задаваемых параметров вспомогательного оборудования, а именно: паропровод (для обогрева технологических ванн); сжатый воздух (для сушки деталей); водопровод (для контроля уровня технологических растворов в ваннах); электрическое оборудование (выпрямитель для задания и управления необходимой токовой нагрузкой и напряжением на ванне анодирования).

В результате описания предметной области и объекта исследования, а также учета факторов внешней среды проведено расширенное моделирование системы систем.

2. АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

На следующем этапе моделирования полученное простейшее описание архитектуры системы расширяется за счет включения дополнительных сущностей ее представления: требования к системе, функции системы, компоненты системы, работы по созданию компонентов системы и, при необходимости, учитываются другие сущности [5].

Методом декомпозиции получены иерархические модели таксономий функций продукта FBS (Functions Breakdown Structure), требований к продукту RBS (Requirements Breakdown Structure), компонент продукта PBS (Product Breakdown Structure) и работ по созданию продукта WBS (Work Breakdown Structure). На рис. 3 в качестве примера показана иерархическая модель таксономии (архитектурная модель) компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.

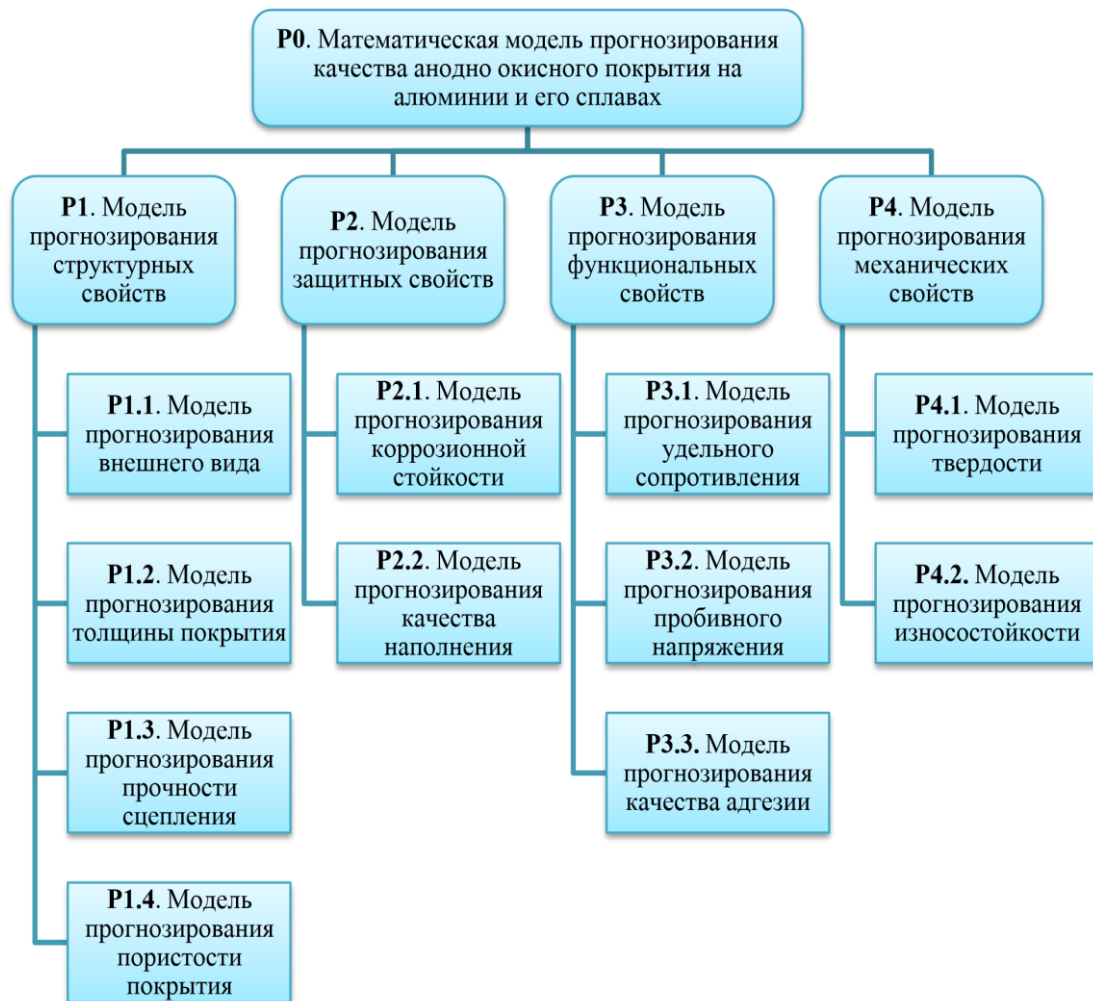


Рисунок 3 – Модель PBS. Иерархическая таксономия компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

Заметим, что на каждом этапе моделирования важно индексировать все компоненты, что делает описания «машиночитаемыми» и адресными, и это позволит избежать ошибок на более поздних стадиях моделирования, в частности, на стадии цифровизации математических моделей.

Смоделировав состав и содержание сущностей продукта, дополним архитектурную модель представлением связанностей введенных сущностей, т.е. увяжем между собой компоненты, функции и требования. В методологии MBSE для этого применяются модели связанностей сущностей DSM (Design Structure Models). Для наглядности их представляют в табличном виде – таблиц отношений.

Для представления связанностей в данной работе построены следующие модели:

□ Таблица отношений (DSM) требований и функций RBS-FBS;

□ Таблица отношений (DSM) функций и компонент FBS-PBS;

□ Таблица отношений (DSM) компонент между собой PBS-PBS.

В таблице 2 показана модель DSM связанностей компонент математической модели прогнозирования между собой.

Из табл. 2 видно, что основными компонентами модели, имеющих наибольшее количество связанностей с другими компонентами, являются компоненты P1.2 и P1.4 (модели прогнозирования толщины и пористости анодно-окисного покрытия), поэтому моделирование целесообразно начинать именно с этих составляющих.

Кроме того, поскольку компонента P1.3 (модель прогнозирования прочности сцепления) не связана с другими компонентами, то ее следует исключить из данной модели. Действительно, прочность сцепления покрытия и основного металла будет зависеть от предварительной обработки деталей (обезжиривание, травление, осветление, промывка), поэтому данную модель целесообразно включить в Модель предварительной подготовки поверхности перед покрытием (см. рис. 2).

3. ПАРАМЕТРИЗИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

Дальнейшее расширение архитектурной модели проводили путем привязки к компонентам иерархической таксономии качественных и количественно измеряемых характеристик продукта – метрик или атрибутов. В таблице 3 представлены иерархии компонент с атрибутами

(P,a)BS в форме таблицы с индексируемыми записями элементов сущностей P и их атрибутов a т.е. присвоены количественные и качественные характеристики.

Таким образом, произведена параметризация ключевых сущностей рассматриваемого продукта,

Таблица 2

Модель DSM (PBS,PBS) связанностей компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

КОМПОНЕНТЫ ПРОДУКТА P	КОМПОНЕНТЫ ПРОДУКТА P											
	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P2.1	P2.2	P3.1	P3.2	P3.3	P4.1	P4.2	
P1.1 Модель прогнозирования внешнего вида				■		■						
P1.2 Модель прогнозирования толщины покрытия	■			■	■		■	■	■	■	■	
P1.3 Модель прогнозирования прочности сцепления												
P1.4 Модель прогнозирования пористости покрытия	■	■			■	■	■	■	■	■	■	
P2.1 Модель прогнозирования коррозионной стойкости		■		■		■						
P2.2 Модель прогнозирования качества наполнения	■	■		■	■							
P3.1 Модель прогнозирования удельного сопротивления		■										
P3.2 Модель прогнозирования пробивного напряжения		■										
P3.3 Модель прогнозирования качества адгезии				■		■						
P4.1 Модель прогнозирования твердости		■		■								
P4.2 Модель прогнозирования износостойкости		■		■								

■ взаимосвязь компонентов друг с другом

Таблица 3

Параметризация компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

№ и атрибуты требований	
Иерархически упорядоченные индексы и имена компонент модели продукта	Метрики и численные атрибуты
P1.1	<p>a1. Прогнозируемый цвет покрытия в зависимости от технологических параметров анодирования, состава электролита</p> <p>a2. Прогнозирование наличия или отсутствия браковочных признаков (вздутий, отслоений и т.д.) в зависимости от чистоты металла, поверхности и толщины АОП</p>
P1.2	<p>a1. Прогнозируемая толщина АОП в зависимости от марки материала, технологических параметров анодирования, состава электролита</p> <p>a2. Прогнозируемое распределение толщины покрытия по поверхности детали в зависимости от температуры электролита и скорости перемешивания</p>

P1.3	a1. Прогнозируемая прочность сцепления в зависимости от предварительной подготовки перед покрытием (обезжиривание, травление, осветление)
P1.4	a1. Прогнозируемое число пор на единицу поверхности детали в зависимости от марки материала, толщины АОП, технологических параметров анодирования, состава электролита a2. Прогнозируемая плотность АОП в зависимости от толщины АОП, технологических параметров анодирования, состава электролита
P2.1	a1. Прогнозируемое время выдержки испытательного раствора на поверхности детали до полного растворения АОП (зависит от толщины АОП)
P2.2	a1. Прогнозируемая масса АОП после операции наполнения в зависимости от толщины и пористости покрытия a2. Прогнозируемая прочность сцепления обеспечивает факт, что покрытие не окрашивается после испытаний
P3.1	a1. Прогнозируемое численное значение удельного сопротивления АОП находится в пределах $10^{10} - 10^{16}$ Ом×мм, в зависимости от толщины, пористости и структуры АОП
P3.2	a1. Прогнозируемое численное значение пробивного напряжения (не менее 250В при толщине 5-8 мкм) в зависимости от марки материала (количество легирующих элементов), чистоты поверхности (шероховатость и пористость поверхности подложки)
P3.3	a1. Величина адгезии по шкале не превышает 1 в зависимости от температуры электролита, времени анодирования
P4.1	a1. Прогнозируемое значение микротвердости, зависящее от марки материала, пористости и толщины АОП
P4.2	a1. Прогнозируемое значение удельного сопротивления к истиранию, напрямую зависящее от микротвердости и толщины АОП, технологических параметров анодирования, температуры электролита и скорости перемешивания

Дальнейшее направление исследований в области создания математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах подразумевает выполнение следующих этапов:

1. Создание математической модели путем расширения параметризованной архитектурной модели учитываемыми и математически выраженными характеристиками продукта, их взаимозависимостей и математически представленными алгоритмами.

2. Цифровизация математической модели – создание компьютерной модели. Унифицированное расширение состава моделей позволяет выйти на системное формирование платформ моделей целевой системы и более широко на формирование платформ моделей предметной области. Платформы могут иметь в своем составе модели разного вида – онтологические, архитектурные, когнитивные, математические и др. [17-19].

Созданная на финальном этапе исследования компьютерная модель прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах совместно с моделью предварительной подготовки поверхности (рис. 2), включающие

ситуационные данные реального производственного объекта, представляют собой составную часть виртуального элемента ЦД.

Виртуальный элемент ЦД – это цифровая модель объекта, способная воспроизводить геометрию, физико-химические свойства, поведение и правила, позволяющие оптимизировать поведение системы. В данном элементы ЦД сгенерированы такие технологии, как CAD-модели (3D твердотельное моделирование), моделирование физикохимических процессов, моделирование поведения объекта (создаваемая компьютерная модель), моделирование, основанное на правилах, анализ согласованности моделей, а также интеграция моделей.

Таким образом, для того чтобы в полной мере раскрыть возможности методологии MBSE, следует рассматривать данную технологию как метод решения проблемы увеличения сложности многокомпонентных технических систем. Вновь создаваемые и модернизируемые технические системы становятся все более аффилированными, что приводит к потенциальному росту сложности прогнозирования и планирования поведения систем.

Концепция MBSE является ответом на такие вызовы и направлена на синтез моделей знаний; на улучшение коммуникаций, обеспечиваемых моделями; на более качественную оценку согласованности, полноты и корректности моделей; на развитие преодоления сложностей и повышения качества создаваемых систем; на совершенствование экстракции знаний и повторного их применения (что ведет к уменьшению времени производственного цикла и снижению затрат на обслуживание [3]).

В то же время ЦД базируется на согласованном и непротиворечивом наборе мультидисциплинарных и мультимасштабных моделей системы на всех этапах жизненного цикла, следовательно, применение и внедрение MBSE-подхода – это один из существенных этапов ЦД-решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кондратьев В.В. Управление архитектурой предприятия (Конструктор регулярного менеджмента). Изд. 2-е дораб. и дополн. М.: Инфра-М, 2019. 358 с.

Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.

Kasser, J.E. (2019). *Systems Engineering: A Systemic and Systematic Methodology for Solving Complex Problems* (1st ed.). 472 p. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429425936>

Интервью с А.И. Боровковым [Электронный ресурс] / Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ, 2021. – Режим доступа: <https://fea.ru/news/7687>.

Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2021. – 102 с.

Скопинцев В.Д. Оксидирование алюминия и его сплавов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 120 с.

Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

Гальванотехника. Справочник / Под ред. Гинберга А.М. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.

Артур В. Браке. Технологии анодирования алюминия. – М.: Interall, 2000.

Скопинцев В.Д. Разработка технологии нанесения на алюминий анодно-окисных покрытий с повышенной защитной способностью в хлоридсодержащих средах.//

Дисс. Канд. Техн. Наук. 1987.

Hunter M., Fowle P. Factors affecting the formation of anodic oxide coatings // *Journal of the electrochemical society*. – 1954, v. 101, №10. – p. 514-519.

Томашов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.

Голубев А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 200 с.

Zahavi J., Kerbel H., Kord R. AC anodizing processes of aluminum alloys // *Journal of the electrochemical society*. – 1982, v. 127, №7. – p. 1572-1579.

ГОСТ 9.305-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий.

Производственная инструкция ПИ 1.2.616-2003. Сернокислотное анодное окисление алюминиевых сплавов.

Алещенко А.С., Клишев О.П., Кондратьев В.В., Рассказов А.А. Совмещение архитектурных и математических моделей в системном инжиниринге технических систем // *Космонавтика и ракетостроение*, 2021, №5 (122).

Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Давыденко Е.В., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем // *Труды МФТИ. Серия информатика и управление*, 2022, том 14, №2. – с. 149-161.

Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое исправленное и дополненное / научный редактор профессор Боровков А. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.