

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.89

DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-176-189

Концепция поддержки лазерного аддитивного производства на основе онтологического подхода

В.В. Грибова, В.А. Тимченко

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

Аннотация

Предложена общая концепция программно-информационной поддержки лазерного аддитивного производства металлических изделий из порошковых композиций. В её основу положен онтологический двухуровневый подход к формированию знаний о процессах лазерного аддитивного производства. При таком подходе онтология явно отделена от базы знаний, и профильные специалисты могут самостоятельно формировать и развивать знания в понятном для них концептуальном представлении. Предложена общая архитектура, описан состав и назначение информационных и программных компонентов комплекса поддержки принятия решений в процессах лазерного аддитивного производства. К информационным компонентам относятся онтологии, базы данных, содержащие информацию о компонентах систем лазерного аддитивного производства и материалах для аддитивного производства, а также база знаний и база прецедентов. В базе знаний содержится формализованная информация о настройках режимов лазерного аддитивного производства, обеспечивающих соответствие получаемых металлических деталей требованиям действующих нормативных документов отрасли. База прецедентов содержит структурированное описание протоколов использования лазерных технологических комплексов для аддитивного производства металлических изделий из металлопорошковых композиций. К программным компонентам относятся редакторы для формирования и сопровождения баз данных и базы знаний, система поддержки принятия решений, основанная как на знаниях, так и на прецедентах, а также средство структуризации базы прецедентов. Для моделирования физико-химических процессов используются соответствующие внешние программные средства. При принятии решений используется гибридный подход, объединяющий методы инженерии знаний и поиска по аналогии на основе прецедентов. Особенностью подхода является непрерывное обновление базы знаний за счёт её совершенствования экспертами и верификации в процессе накопления прецедентов.

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений, лазерное аддитивное производство, лазерные технологические комплексы, прямое лазерное выращивание, онтологии.

Цитирование: Грибова, В.В. Концепция поддержки лазерного аддитивного производства на основе онтологического подхода / В.В. Грибова, В.А. Тимченко // Онтология проектирования. – 2020. – Т.10, №2(36). – С.176-189. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-176-189.

Введение

Технологии аддитивного построения, восстановления (ремонта) или модификации сложнопрофильных (со сложной геометрией) функциональных металлических изделий находят всё большее применение в различных отраслях промышленности [1–3]. Под модификацией изделия понимается нанесение на него функционального покрытия (слоя), которое придаёт изделию необходимые свойства. Аддитивные технологии позволяют с минимальными (в том числе энергетическими) затратами реализовать любые конструкторские и инженерные идеи

в наукоёмких и высокотехнологичных отраслях производства, таких, как авиастроение, ракетостроение, судостроение, медицина. Вместе с тем, недостаточное количество высококлассных специалистов в области аддитивного производства (АП) с использованием лазерных технологических комплексов является серьёзным препятствием к широкому внедрению этой передовой технологии в производственные процессы. Сложность настройки лазерной системы под конкретную технологическую задачу обусловлена многообразием обрабатываемых материалов, различными требованиями к характеру обработки и её результатам, а также регулируемыми параметрами лазерных комплексов. Большая часть существующих знаний основана на эмпирических правилах и экспериментальных исследованиях [4]. Многие доступные в настоящее время рекомендации в сфере АП в значительной степени зависят от конкретного аппаратного технологического комплекса и/или используемых материалов, что тормозит выработку строгих стандартов и производственных рекомендаций по настройке параметров технологических процессов [5].

Создание и внедрение в существующие системы АП информационно-программных компонентов интеллектуальной поддержки и автоматизации технологических процессов восполнит недостаток практического опыта операторов систем АП, позволит существенно снизить требования к их квалификации, а также затраты на производство и утилизацию отходов. Это практически исключает ситуации, когда производство попадает в экономическую зависимость от конкретного инженера-технолога, имеющего большой опыт и навыки работы в этой сфере. Потери на обучение специалиста в случае его смены негативно могут отразиться на экономическом состоянии предприятия: требуются годы напряжённой работы и большое количество дорогостоящего порошкового материала для приобретения у специалиста-технолога необходимых компетенций, позволяющих выполнить процедуры необходимой настройки системы АП [6]. Стоит заметить, что металлопорошковые композиции для систем АП в основном приходится закупать за рубежом [7].

Таким образом, актуальной является задача создания средств интеллектуальной поддержки АП функциональных металлических изделий из металлопорошковых композиций, автоматизирующих подбор регулируемых параметров технологических операций, обеспечивающих соответствие получаемых изделий требованиям действующих нормативных документов отрасли.

Работа посвящена описанию общей концепции программно-информационной поддержки лазерного АП металлических изделий из порошковых композиций на основе онтологического подхода. Рассматривается один из наиболее перспективных видов аддитивных технологий (согласно [8, 9]), известный как «прямой подвод энергии непосредственно в место построения» (*Directed Energy Deposition, DED*). Это процесс АП, в котором сфокусированная энергия от внешнего источника (например, мощного лазера, в случае лазерного АП) используется для соединения материалов путём их сплавления в процессе нанесения.

1 Средства поддержки АП металлических изделий

Современная технология лазерного АП металлических изделий из металлопорошковых композиций базируется как на разработанных теоретических моделях, так и на многочисленных экспериментальных данных, в том числе – на практическом опыте работы квалифицированных специалистов-технологов.

Теоретические и экспериментальные исследования, а также прикладные работы по созданию систем поддержки принятия решений (СППР), оказывающих инженерам-технологам помощь в подборе оптимальных параметров лазерных технологических процессов обработки материалов, ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [10–15].

Задача, направленная на создание СППР для лазерных технологических процессов обработки материалов и сопряжение таких систем с конкретным эксплуатируемым лазерным оборудованием, в достаточной мере пока не решена [16]. В качестве одной из основных причин можно назвать отсутствие открытых (не проприетарных) технологических платформ поддержки профессиональной кросс-дисциплинарной кооперации исследовательских групп.

В настоящее время исследователи, как из производственной, так и из академической среды работают над достижением лучшего понимания влияния разных процессов лазерного АП на изготовление металлических изделий. Ввиду необходимости учитывать большое количество разнородных параметров, добиться надёжной воспроизводимости этих процессов весьма сложно. В работах [5, 17, 18] обсуждается возможность использования онтологического подхода для:

- концептуализации различных моделей и параметров комплексных процессов АП, которые легко интегрировать друг с другом;
- построения моделей процессов АП, пригодных для повторного использования;
- обеспечения возможности стандартизации описаний и координации усилий различных исследовательских групп.

Разработка онтологической структуры процесса лазерного АП, на основе которой может быть формализована информация (знание) о различных моделях и параметрах АП и их связях друг с другом, является первым и важным шагом к их повторному использованию, а также к всестороннему пониманию процессов лазерного АП из металлопорошковых композиций [18].

Современное состояние в области формализации знаний об АП основано на дескриптивных логиках, а также на формализме теории категорий (category ontologies), используемых для описания различных онтологий АП, таких как онтология проектирования [19, 20] и онтология процессов [5, 18]. В этих же работах приводится онтология (мета-модель), позволяющая специфицировать модели источников лазерного излучения, тепловые модели, модели механики, описывающие физико-механические свойства изготавливаемых металлических изделий и микроструктуры, а также различные группы параметров и взаимосвязи между ними для процесса АП. Для разработки онтологии в [17, 18] используется программное средство *Protégé* [21].

Онтологии и мета-модели рассматриваются как средство повышения структуризации и унификации спецификаций при разработке моделей АП. Стоит отметить, что это справедливо и для других (не только аддитивных) лазерных технологических процессов обработки материалов.

Комплексные (интеграционные) концептуальные (мета-)модели в сфере АП полезны, прежде всего, опытным специалистам и разработчикам стандартов в данной области. Операторы промышленных технологических комплексов для АП в условиях ремонтного предприятия или мелкосерийного производства нуждаются в основанных на таких моделях программных продуктах, оказывающих помощь в подборе настраиваемых параметров технологических процессов, которые обеспечивали бы соответствие изготавливаемых металлических изделий требованиям соответствующих отраслевых нормативных документов. Поэтому развитием этих работ может стать создание на основе онтологии АП web-сервисов, к которым заинтересованные пользователи могут иметь свободный доступ с целью получения обновления знаний о процессах АП. Конечная цель состоит в предоставлении возможности быстрого и точного предиктивного моделирования различных процессов АП [22].

Таким образом, разработка программного комплекса, предназначенного для повышения уровня информационного обеспечения инженеров-технологов при подготовке и принятии

решений в ходе выполнения технологических процессов лазерного АП металлических изделий, является актуальной задачей.

2 Комплекс поддержки принятия решений в процессах лазерного АП

Основными требованиями, которые необходимо обеспечить при разработке программно-информационного комплекса поддержки принятия решений в сфере лазерного АП металлических изделий из металлопорошковых композиций, являются его гибкость и оперативная расширяемость, а также доступность и простота использования операторами (инженерами-технологами) лазерного технологического комплекса.

Для удовлетворения этих требований предложено использовать онтологический двухуровневый подход к формированию знаний о процессах лазерного АП металлических изделий. При таком подходе онтология явно отделена от базы знаний (БЗ). Она формируется инженерами знаний совместно с экспертами. Далее в терминах этой онтологии пользователи-эксперты самостоятельно создают и развивают знания в понятной для них терминологии и представлении (онтология и БЗ представляются семантическими сетями) [23, 24]. Предлагается использовать облачные технологии для обеспечения лёгкого, кроссплатформенного доступа к централизованным облачным банкам информации и средствам их формирования, а также средству поддержки принятия решений [25].

Совместно с экспертами – опытными специалистами по аддитивной технологии прямого лазерного выращивания металлических изделий из металлопорошковых композиций была проведена структуризация рассматриваемой предметной области. Определены основные параметры компонентов лазерного технологического комплекса, влияющие на ход процесса лазерного АП и определяющие его результат, которые должны учитываться инженером-технологом (определяющие параметры).

В результате анализа были выделены информационные и программные компоненты комплекса поддержки принятия решений в процессах лазерного АП (рисунок 1).

2.1 Информационные компоненты

К информационным компонентам комплекса относятся: онтологии, знания и данные.

2.1.1 Онтологии

К этой группе информационных компонентов относится набор следующих связанных онтологий.

Онтология технологических операций. Входная информация для каждой технологической операции представляет собой спецификацию характеристик следующей совокупности объектов (рисунок 2)¹:

- вид процесса – восстановление детали, наплавка функционального покрытия, изготовление новой детали;
- оборудование для выполнения операции – технологический лазер, укомплектованная лазерная технологическая головка, порошковый питатель и т.д.;
- формализованное техническое задание (ТЗ) на выполнение технологической операции.
ТЗ включает:
 - зафиксированные в стандартах и руководящих документах требования к форме, структуре, характеристикам результирующего изделия: геометрические размеры,

¹ На данном рисунке (и всех остальных) изображён интерфейс инструментального средства облачной платформы IASaaS «Редактор онтологий», который используется для формирования онтологий в Фонде платформы [25]. *Прим. авт.*

шероховатость поверхности, пористость, твёрдость, микроструктура, остаточное напряжение и т.п.;

- характеристики обрабатываемой детали: геометрическая форма, химический состав, оптические свойства, теплофизические свойства, металлургические свойства (в случае восстановления детали или наплавки на неё функционального покрытия);
- используемый металлический порошок и, возможно, используемые технологические газы.

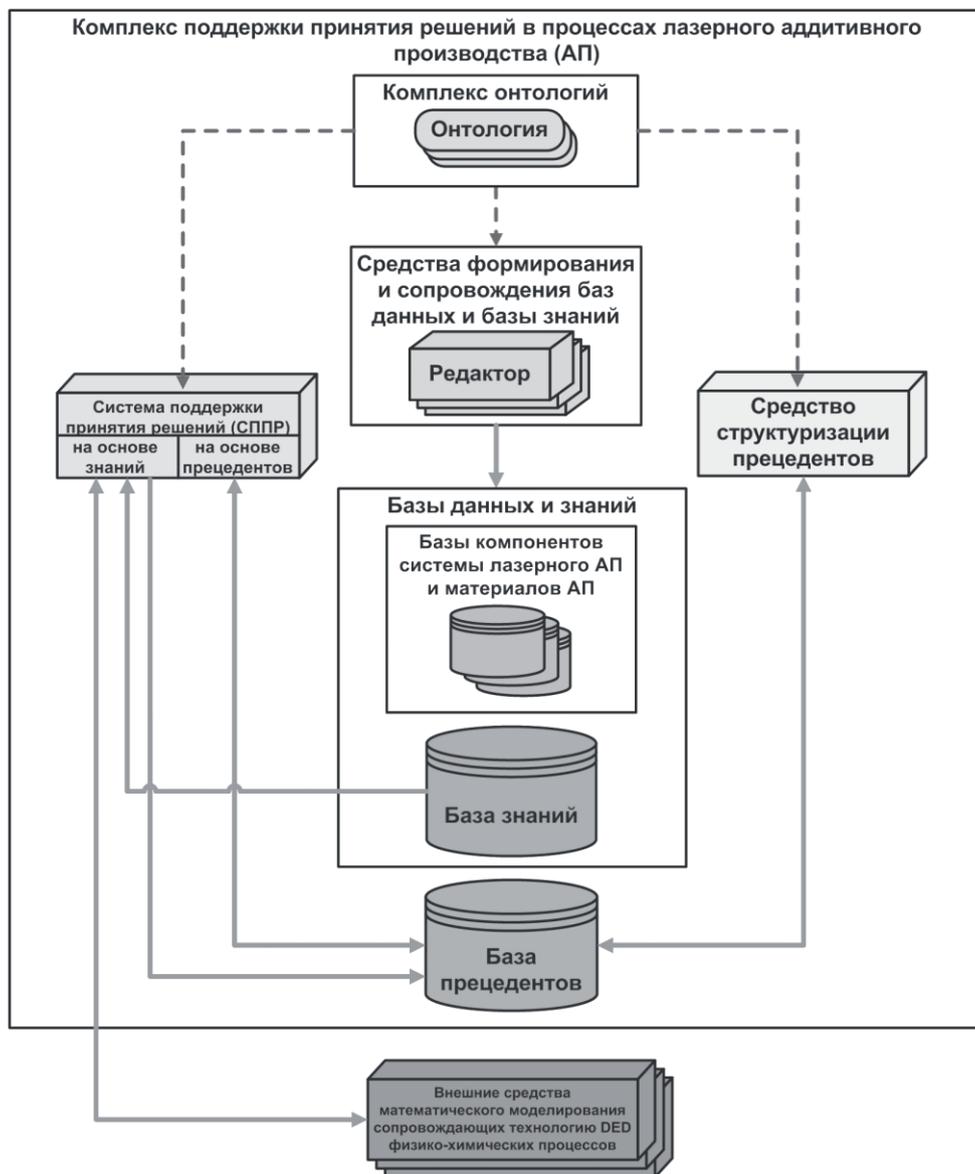


Рисунок 1 – Концептуальная схема комплекса поддержки принятия решений в процессах лазерного аддитивного производства

Выходная информация для технологической операции представляет собой спецификацию характеристик следующей совокупности объектов.

- Настройки (значения) определяющих управляющих параметров технологической операции – набор регулируемых рабочих параметров и системных настроек. К таким параметрам относятся: мощность лазерного излучения; режим генерации лазерного излучения (непрерывный, импульсный); размер (диаметр) пятна лазерного пучка на обрабатываемой

поверхности; линейная скорость перемещения лазерного пучка по поверхности; величина вертикального (z) и горизонтального (x, y) смещения между слоями и проходами, соответственно; расход порошка, расход транспортного, защитного и обжигающего газов и др. Сюда могут быть отнесены рекомендуемые для использования технологические газы.

- Характеристики подложки, на которой выращивается деталь (в случае изготовления новой детали). За исключением геометрической формы они во многом совпадают с набором характеристик, описывающих обрабатываемую деталь.
- Формализованный протокол о проведении операции.

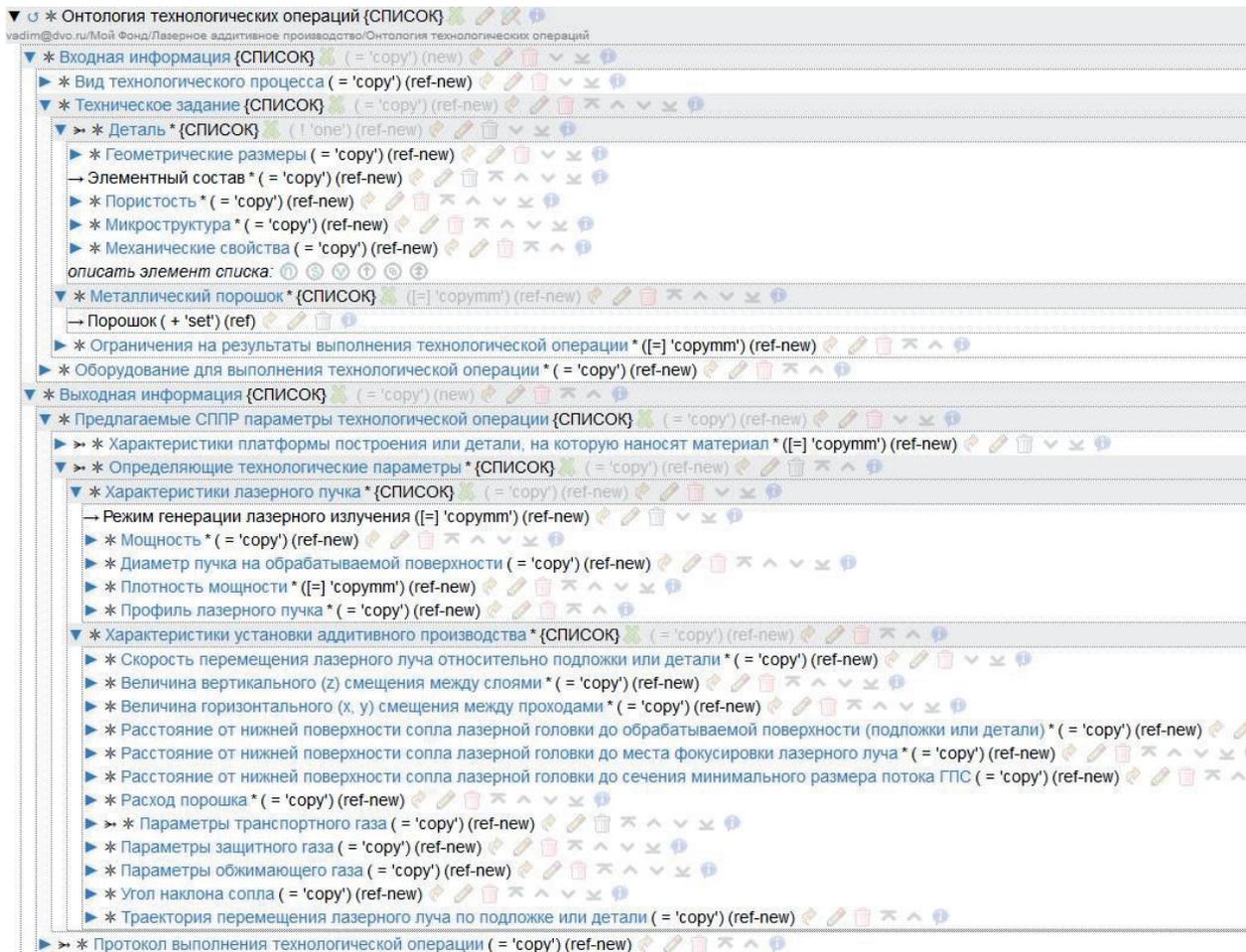


Рисунок 2 – Фрагмент онтологии для спецификации технологических операций (скриншот)

В протоколе, помимо обязательной информации (номер, дата, название операции и т.п.), фиксируются:

- фактически выбранные оператором оборудования настройки управляющих параметров технологической операции (они могут как совпадать с предлагаемыми СППР, так и отличаться от них);
- результат выполнения операции – деталь с характеристиками, соответствующими или не соответствующими требованиям, сформулированным в ТЗ.

Чтобы обеспечить возможность унифицированного и стандартизованного (в том числе согласованного по терминологии) описания оборудования и расходных материалов для лазерного АП, а также возможность использования этих описаний при спецификации технологических операций, в состав комплекса онтологий входят следующие онтологии.

Онтологии баз компонентов лазерного технологического комплекса (в качестве системы АП): технологических лазеров (рисунок 3); укомплектованных лазерных технологических головок; устройств, обеспечивающих перемещение головки относительно поверхности построения; порошковых питателей.

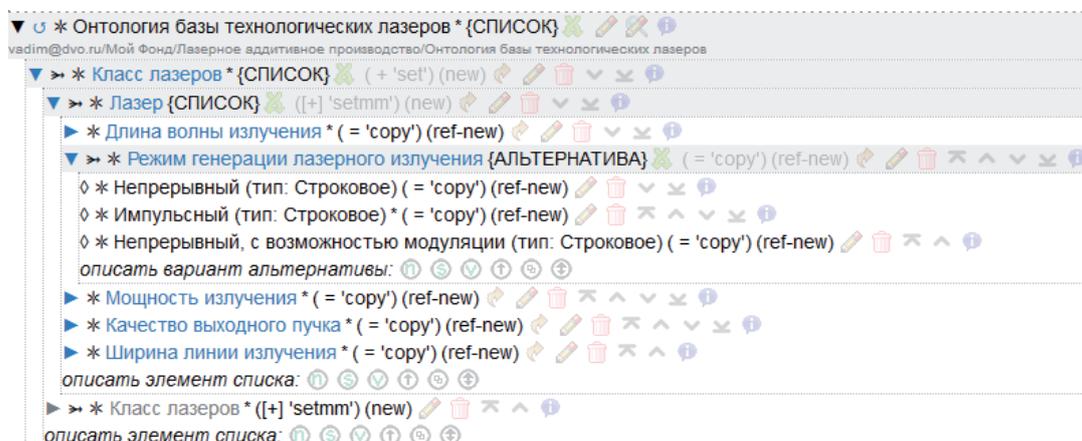


Рисунок 3 – Фрагмент онтологии базы технологических лазеров (скриншот)

Онтология базы металлических порошков для спецификации таких данных, как гранулометрический состав и процентное содержание основной фракции, химический состав (номинальный и основные компоненты в соответствии с нормативно-технической документацией), температура плавления (в т.ч. температура солидус и температура ликвидус), текучесть, насыпная плотность и пр. (рисунок 4).

Онтология базы технологических газов для спецификации таких характеристик технологического газа, как его наименование, марка, сорт и пр.

Для формирования знаний, на основе которых принимаются решения об оптимальных режимах лазерного АП, в состав комплекса онтологий входит онтология БЗ.

БЗ формируется квалифицированными специалистами-технологами на основе собственного опыта и информации из неформализованных источников (руководств, научных статей, документированных результатах экспериментов). В результате использования СППР накапливается база прецедентов (формализованных протоколов о проведённых технологических операциях), которые используются для вывода на основе прецедентов (если их количество невелико), либо для формирования БЗ с использованием методов индуктивного обобщения данных (если объём выборки достаточен для обучения).

В состав комплекса онтологий входит также онтология базы прецедентов, в соответствии с которой формируется структурированное множество формализованных протоколов (отчётов) о проведённых технологических операциях (рисунок 5). Каждый прецедент может принадлежать одному из следующих классов, разграничивающих ситуации, когда:

- 1) предложено правильное и точное решение;
- 2) предложено правильное, но неточное решение (несколько возможных альтернатив, среди которых было и правильное решение);
- 3) предложено неправильное решение (множество альтернатив, возможно пустое, среди которых не было правильного решения);
- 4) не предложено решений (создан отчёт об использовании лазерного технологического комплекса при выполнении технологической операции, однако система не смогла предложить решение, оператор принял решение самостоятельно).

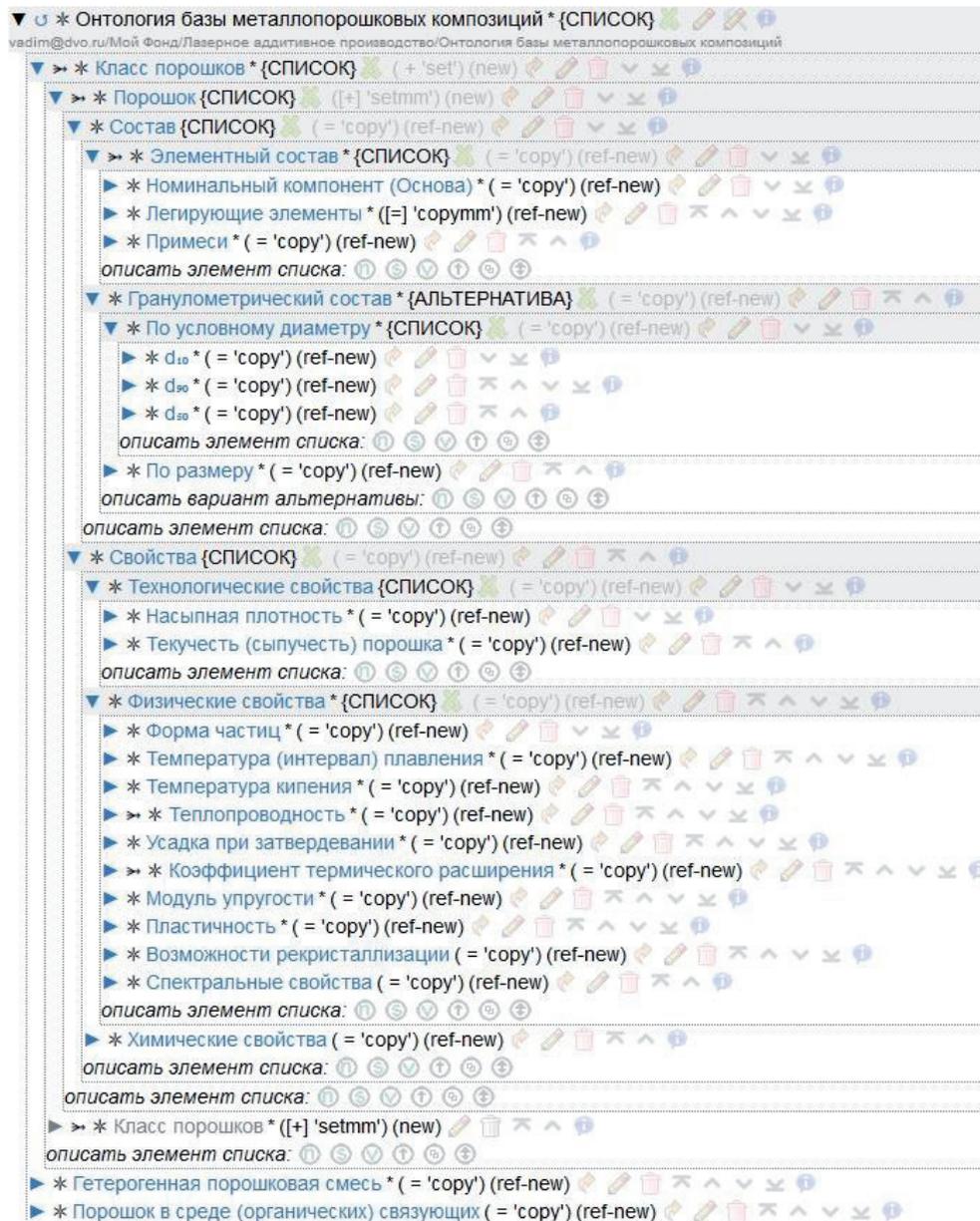


Рисунок 4 – Фрагмент онтологии базы металлопорошковых композиций (скриншот)

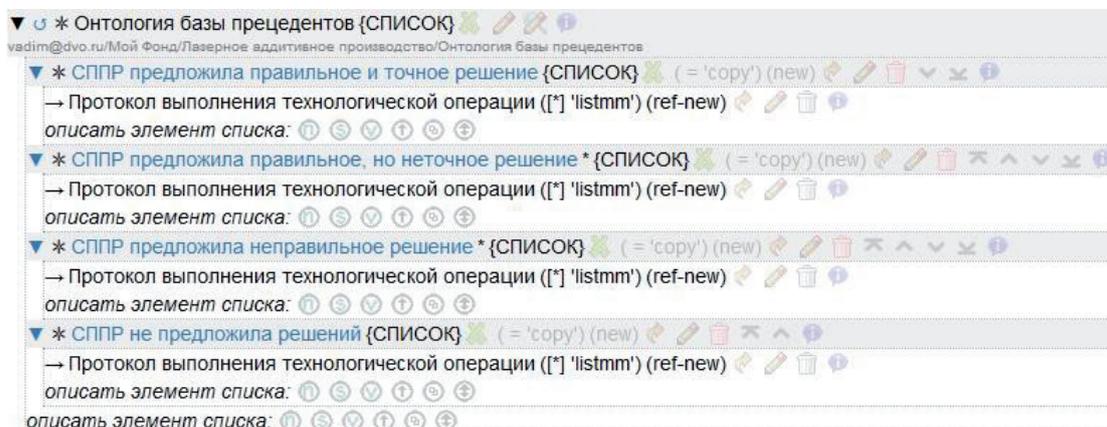


Рисунок 5 – Фрагмент онтологии базы прецедентов (скриншот)

2.1.2 Базы данных и знаний

К этой группе информационных компонентов относятся *базы данных (БД) и БЗ*, сформированные на основе соответствующих онтологий.

БД содержат информацию о *компонентах системы лазерного АП и материалах АП*. Это базы технологических лазеров; укомплектованных лазерных технологических головок; устройств, обеспечивающих перемещение головки относительно поверхности построения; порошковых питателей; металлических порошков и технологических газов. В этих базах содержится также информация о регулярных обеспечивающих качество мероприятиях, проводимых для соответствующего оборудования и порошкового материала.

БЗ о настройках режимов лазерного АП, обеспечивающих соответствие получаемых металлических деталей требованиям действующих нормативных документов отрасли, предъявляемым к деталям/изделиям такого типа. В БЗ содержатся формально представленные зависимости, устанавливающие взаимосвязи между составом и свойствами наносимых порошковых материалов, режимом их нанесения (набором регулируемых рабочих параметров и системных настроек), а также создаваемой при этом газовой средой, и свойствами результирующих деталей/изделий.

Помимо БД и БЗ, в состав информационных компонентов комплекса входит *база прецедентов*, формируемая на основе соответствующей онтологии. Эта база содержит структурированное описание протоколов использования лазерных технологических комплексов для АП металлических изделий из металлопорошковых композиций. Базу прецедентов предлагается использовать для выполнения двух процессов.

- Для индуктивного (наряду с экспертным формированием с помощью редактора БЗ) формирования, непрерывной верификации и улучшения БЗ в процессе эксплуатации и системы управления знаниями. В обоих случаях формирование БЗ выполняется на основе онтологии, что делает её понятной и хорошо интерпретируемой экспертами. Таким образом обеспечивается *гибридный подход* к формированию знаний.
- Для поиска в базе прецедентов наиболее близкого прецедента по параметрам, указанным пользователем, в случае, если соответствующие знания отсутствуют в БЗ. Предполагается использование метода *k* ближайших соседей, основанного на знаниях о предметной области [26].

При появлении нового прецедента оценивается соответствие прецедента текущему состоянию БЗ.

Прецеденты классов 1) и 2) образуют множество адекватно решаемых по оцениваемой версии БЗ задач и не требуют её модификации.

Прецеденты класса 3) требуют модификации БЗ, которая не ухудшает её: после модификации проверка БЗ на прежнем множестве прецедентов должна демонстрировать отсутствие прецедентов этого класса.

Класс 4) требует накопления для последующего использования методов индуктивного формирования знаний для расширения БЗ.

2.2 Программные компоненты

К программным компонентам комплекса относятся следующие средства.

Редакторы для формирования и сопровождения БД и БЗ, управляемые соответствующими онтологиями. Редакторы поддерживают несколько типов пользовательских интерфейсов и автоматически адаптируются под изменения онтологий.

СППР, которая на основе входной информации для заданной технологической операции, а также информации из БЗ или базы прецедентов выдаёт рекомендации по настройке управ-

ляющих параметров лазерного технологического комплекса, обеспечивающих соответствие детали требованиям, сформулированным в ТЗ. Разработка онтолого-ориентированной СППР направлена на обеспечение возможности её адаптации (при появлении новых технологических лазеров, порошковых композиций и др.) без модификации программного кода.

Средство структуризации прецедентов, накапливаемых в результате использования СППР, выполняет анализ очередного сформированного прецедента, относит его к одному из четырёх классов и включает в базу прецедентов.

Управляющие параметры технологического процесса, обеспечивающие заданное качество получаемого изделия, необходимо подбирать, основываясь на понимании процессов взаимодействия лазерного излучения с потоком порошка, тепломассопереноса и прочих физико-химических процессов, сопровождающих технологию *DED*. В связи с этим требуется взаимодействие СППР с *внешними средствами математического моделирования физико-химических процессов*, сопровождающих технологию *DED*. Такие средства должны выполнять расчёты необходимых параметров на основе соответствующих математических моделей из области физики лазеров (в том числе взаимодействие лазерного излучения с веществом, потоком порошка), лазерной химии, тепловых моделей, описывающие быстро протекающие термические процессы [27, 28].

Заключение

В работе представлена общая концепция программно-информационной поддержки лазерного АП металлических изделий из порошковых композиций на основе онтологического подхода. Описан состав и назначение информационных и программных компонентов СППР в процессах лазерного АП.

Предложено использовать гибридный подход к обеспечению поддержки принятия решений в сфере лазерного АП, который объединяет методы инженерии знаний и поиск по аналогии с использованием накапливаемой базы прецедентов. Особенностью подхода является непрерывное обновление БЗ за счёт её совершенствования экспертами и верификации в процессе накопления прецедентов.

На основе предложенной концепции на облачной платформе создан портал знаний о технологических процессах (операциях) АП металлических изделий с использованием лазерных технологических комплексов. К настоящему времени разработан ряд информационных и программных компонентов портала знаний.

Интеграция БД и БЗ о режимах АП широкого спектра металлических изделий с заданными свойствами на различных лазерных технологических комплексах в едином информационном пространстве упростит доступ к этой информации всему заинтересованному сообществу. Такие базы будут полезны в процессе обучения операторов лазерных комплексов, а их формализованное представление обеспечит возможность использования этой информации программными системами, разрабатываемыми другими коллективами.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-01-00449, № 19-07-00244).

Список источников

- [1] *Frazier, W.E.* Metal additive manufacturing: A review / W.E. Frazier // Journal of Materials Engineering and Performance. - 2014. - Vol. 23. – P. 1917–1928.

- [2] **Sedlak, J.** Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology / J. Sedlak, D. Rican, M. Piska, L. Rozkosny // *Procedia Engineering*. - 2015. - Vol. 100. - P. 1232–1241.
- [3] **Tack, P.** 3D printing techniques in a medical setting: A systematic literature review / P. Tack, J. Victor, P. Gemmel, L. Annemans // *BioMedical Engineering OnLine*. - 2016. - Vol. 15(115). - P. 1–21.
- [4] **Yang, L.** Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production / L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon, S. Wiener. – Springer, 2017. - 168 S.
- [5] **Qi, Q.** A categorical framework for formalising knowledge in additive manufacturing / Q. Qi, L. Pagani, P. Scott, J. Xiang // *Procedia CIRP*. - 2018. - Vol. 75. - P. 87–91.
- [6] **Thomas, D.S.** Economics of Additive Manufacturing / D.S. Thomas // In: Bian, L., Shamsaei, N., Usher, J. (eds.) *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. – CRC Press, 2017. - 342 S.
- [7] **Юрасёв, Н.И.** Текущие проблемы передовых промышленных аддитивных технологий России на микро-, мезо- и макроуровне экономики / Н.И. Юрасёв // *Современная экономика: проблемы и решения*. - 2017. - № 9. - С. 76–82.
- [8] **Bourell, D.** Materials for additive manufacturing / D. Bourell, J.P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese, A. Clare // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. - 2017. - Vol. 66(2). - P. 659–681.
- [9] **Thompson, S.M.** An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics / S.M. Thompson, L. Bianc, N. Shamsaeia, A. Yadollahi // *Additive Manufacturing*. - 2015. - Vol. 8. - P. 36–62.
- [10] **Майоров, В.С.** Компьютерные системы поддержки принятия решений для лазерных технологических процессов обработки материалов / В.С. Майоров, С.В. Майоров, М.Ю. Стернин // *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок* / под ред. В.М. Панченко: Физматлит, 2009. - С. 494–506.
- [11] **Бессмельцев, В.П.** Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки / В.П. Бессмельцев, Е.Д. Булушев, Н.В. Голошевский // *Известия вузов. Приборостроение*. - 2011. - Vol. 54(2). - С. 17–22.
- [12] **Aminzadeh, M.** Online quality inspection using Bayesian classification in powder-bed additive manufacturing from high-resolution visual camera images / M. Aminzadeh, T. Kurfess // *Journal of Intelligent Manufacturing*. - 2018. - Vol. 30. - P. 2505–2523.
- [13] **Wirth, F.** A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process / F. Wirth, K. Wegener // *Additive Manufacturing*. - 2018. - Vol. 22. - P. 307–319.
- [14] **Qi, X.** Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives / X. Qi, G. Chen, Y. Li, X. Cheng, Ch. Li // *Engineering*. - 2019. - Vol. 5(4). - P. 721–729.
- [15] **Dass, A.** State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design / A. Dass, A. Moridi // *Coatings*. - 2019. – Vol. 9(7), P. 418.
- [16] **Babkin, K.D.** High-Speed Laser Direct Deposition Technology: Theoretical Aspects, Experimental Researches, Analysis of Structure, and Properties of Metallic Products / K.D. Babkin, V.V. Cheverikin, O.G. Klimova-Korsmik, M.O. Sklyar, S.L. Stankevich, G.A. Turichin, A.Ya. Travyanov, E.A. Valdaytseva, E.V. Zemlyakov // In: Anisimov, K. et al. (eds.) *Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016"*. – Springer, Cham, 2018. - P. 501–509.
- [17] **Witherell, P.** Toward Metamodels for Composable and Reusable Additive Manufacturing Process Models / P. Witherell, S. Feng, T.W. Simpson, D.B. Saint John, P. Michaleris, Z. Liu, L. Chen, R. Martukanitz // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. - 2014. - Vol. 136(6). - №061025. - P. 1–9.
- [18] **Roh, B.M.** Ontology-based laser and thermal metamodels for metal-based additive manufacturing / B.M. Roh, S.R.T. Kumara, T.W. Simpson, P. Michaleris, P. Witherell, I. Assouroko // In: *36th Computers and Information in Engineering Conference (Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference)*. – ASME Digital Collection, 2016. - Vol. 1A-2016. - P.1–8.
- [19] **Dinar, M.** A Design for Additive Manufacturing Ontology / M. Dinar, D.W. Rosen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. - 2017. - Vol. 17(2). - №021013. - P. 1–9.
- [20] **Jee, H.** A method for modularity in design rules for additive manufacturing / H. Jee, P. Witherell // *Rapid Prototyping Journal*. - 2017. - Vol. 23(6). - P.1107–1118.
- [21] **Musen, M.A.** The Protégé project: A look back and a look forward / M.A. Musen // *AI Matters*. - 2015. - Vol. 1(4). - P.4–12.
- [22] **Roh, B.M.** Ontology-Based Laser Metamodels and Visualization for Metal-Based Additive Manufacturing / B.M. Roh // *Thesis*. - 2017. - https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/16206.
- [23] **Gribova, V.V.** Control of Intelligent Systems / V.V. Gribova, A.S. Kleshchev, E.A. Shalfeeva // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. - 2010. - Vol. 49(6). - P.952–966.

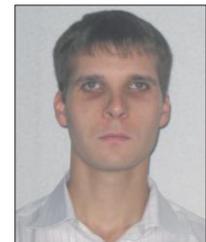
- [24] **Грибова, В.В.** Обеспечение жизнеспособности систем, основанных на знаниях / В.В. Грибова, Е.А. Шалфеева // Информационные технологии. - 2019. - Т. 25, №12. - С.738–746.
- [25] **Грибова, В.В.** Облачная платформа IASaaS для разработки оболочек интеллектуальных сервисов: состояние и перспективы развития / В.В. Грибова, А.С. Клещев, Ф.М. Москаленко, В.А. Тимченко, Л.А. Федорищев, Е.А. Шалфеева // Программные продукты и системы. - 2018. - Т. 31, №3. - С.527–536.
- [26] **Варшавский, П.П.** Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений / П.П. Варшавский, А.П. Еремеев // Искусственный интеллект и принятие решений. - 2009. - №2. - С.45–57.
- [27] **Heigel, J.C.** Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V / J.C. Heigel, P. Michaleris, E.W. Reutzel // Additive manufacturing. - 2015. - Vol. 5. - P.9–19.
- [28] **Raghavan, A.** Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing / A. Raghavan, H.L. Wei, T.A. Palmer, T. DebRoy // Journal of Laser Applications. - 2013. - Vol. 25(5). - P.1–8.

Сведения об авторах



Грибова Валерия Викторовна, 1965 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт (1989), д.т.н. (2007). Заведующая лабораторией интеллектуальных систем Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, заместитель директора по научной работе, вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 200 работ в области искусственного интеллекта, проблемно-ориентированных систем, основанных на знаниях. AuthorID (РИНЦ): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; ORCID: 0000-0001-9393-351X; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016. gribova@dvo.ru.

Тимченко Вадим Андреевич, 1983 г. рождения. Окончил Институт математики и компьютерных наук Дальневосточного государственного университета (2005), к.т.н. (2011). Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. В списке научных трудов более 50 работ в области искусственного интеллекта, проблемно-ориентированных систем, основанных на знаниях, специализированных программных моделей и систем. AuthorID (РИНЦ): 180470; Author ID (Scopus): 57201774103; ORCID: 0000-0002-1314-7656; Researcher ID (WoS): Q-4380-2016. vadim@dvo.ru.



Поступила в редакцию 22.05.2020, после рецензирования 25.05.2020. Принята к публикации 11.06.2020.

The concept of support for laser-based additive manufacturing on the basis of ontological approach

V.V. Gribova, V.A. Timchenko

Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract

A general concept of software and information support for laser-based additive manufacturing of metal parts from powder compositions is proposed. It is based on an ontological two-level approach to the formation of knowledge about the processes of laser additive manufacturing. Under this approach, the ontology is clearly separated from the knowledge base. So subject-matter specialists can create and develop knowledge in the representation that they understand. The conceptual architecture of the decision support software for laser-based additive manufacturing processes is presented. Its information and software components are described. Information components are ontologies, databases of laser-based additive manufacturing system components, databases of materials for additive manufacturing, knowledge base and case database. The knowledge base contains formalized information on the settings of laser-based additive manufacturing modes that ensure compliance of the obtained metal parts with the requirements of the current industry-

specific guidelines (regulatory documents for this type of parts). The case database contains a structured description of the protocols for using laser technological equipment for additive manufacturing of metal parts from powder compositions. Software components are editors for creating and maintaining data and knowledge bases (controlled by the corresponding ontologies), decision support system based on both, knowledge and cases, and tool for cases structuring. There are also external tools for mathematical modelling of directed energy deposition physicochemical processes. When making decisions a hybrid approach that combines knowledge engineering methods and case-based search by analogy is proposed. The specialty of the approach is the continuous knowledge base update due to its improvement by experts and due to its verification in the process of accumulating cases.

Key words: *decision support systems, laser-based additive manufacturing, laser technological equipment, directed energy deposition, ontologies.*

Citation: *Gribova VV, Timchenko VA.* The concept of support for laser-based additive manufacturing on the basis of ontological approach [In Russian]. *Ontology of designing.* 2020; 10(2): 176-189. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-176-189.

Acknowledgment: *This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project numbers 20-01-00449, 19-07-00244).*

List of figures

- Figure 1 - Conceptual scheme of the decision support software for laser-based additive manufacturing processes
- Figure 2 - A fragment of the ontology of technological operations (screen capture)
- Figure 3 - A fragment of the ontology of technological lasers database (screen capture)
- Figure 4 - A fragment of the ontology of metal powders database (screen capture)
- Figure 5 - A fragment of the case database ontology (screen capture)

References

- [1] **Frazier WE.** Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2014; 23: 1917–1928.
- [2] **Sedlak J, Rican D, Piska M, Rozkosny L.** Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology. *Procedia Engineering* 2015; 100: 1232–1241.
- [3] **Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L.** 3D printing techniques in a medical setting: A systematic literature review. *BioMedical Engineering OnLine* 2016; 15(115): 1–21.
- [4] **Yang L, Hsu K, Baughman B, Godfrey D, Medina F, Menon M, Wiener S.** Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Springer; 2017.
- [5] **Qi Q, Pagani L, Scott P, Xiang J.** A categorical framework for formalising knowledge in additive manufacturing. *Procedia CIRP* 2018; 75: 87–91.
- [6] **Thomas DS.** Economics of Additive Manufacturing. In: Bian, L., Shamsaei, N., Usher, J. (eds.) *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties.* CRC Press; 2017.
- [7] **Yurasev NI.** The problems of Russian advanced industrial additive technologies in Micro, Meso and Macro economics [In Russian]. *Modern Economics: Problems and Solutions* 2017; 9: 76–82.
- [8] **Bourell D, Kruth JP, Leu M, Levy G, Rosen D, Beese AM, Clare A.** Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2017; 66(2): 659–681.
- [9] **Thompson SM, Bianc L, Shamsaeia N, Yadollahi A.** An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing* 2015; 8: 36–62.
- [10] **Mayorov VS, Mayorov SV, Sternin MYu.** Computer decision support systems for laser technological processes of material processing [In Russian]. In: Panchenko, V.M. (ed.) *Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental research and applied development.* - Moscow: Fizmatlit; 2009.
- [11] **Bessmeltsev VP, Bulushev ED, Goloshevsky NV.** An expert system for laser micro-processing mode optimization [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering* 2011; 54(2): 17–22.
- [12] **Aminzadeh M, Kurfess T.** Online quality inspection using Bayesian classification in powder-bed additive manufacturing from high-resolution visual camera images. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2018; 30: 2505–2523.

- [13] **Wirth F, Wegener K.** A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process. *Additive Manufacturing* 2018; 22: 307–319.
- [14] **Qi X, Chen G, Li Y, Cheng X, Li Ch.** Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives. *Engineering* 2019; 5(4): 721–729.
- [15] **Dass A, Moridi A.** State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings* 2019; 9(7): 418.
- [16] **Babkin KD, Cheverikin VV, Klimova-Korsmik OG, Sklyar MO, Stankevich SL, Turichin GA, Travyanov AYa, Valdaytseva EA, Zemlyakov EV.** High-Speed Laser Direct Deposition Technology: Theoretical Aspects, Experimental Researches, Analysis of Structure, and Properties of Metallic Products. In: Anisimov, K. et al. (eds.) *Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016"*. Springer, Cham; 2018: 501–509.
- [17] **Witherell P, Feng S, Simpson TW, Saint John DB, Michaleris P, Liu Z, Chen L, Martukanitz R.** Toward Metamodels for Composable and Reusable Additive Manufacturing Process Models. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 2014; 136(6), №061025: 1–9.
- [18] **Roh BM, Kumara SRT, Simpson TW, Michaleris P, Witherell P, Assourocko I.** Ontology-based laser and thermal metamodels for metal-based additive manufacturing. In: *36th Computers and Information in Engineering Conference (Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference)*. ASME Digital Collection; 2016, 1A-2016: 1–8.
- [19] **Dinar M, Rosen DW.** A Design for Additive Manufacturing Ontology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 2017; 17(2), №021013: 1–9.
- [20] **Jee H, Witherell P.** A method for modularity in design rules for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal* 2017; 23(6): 1107–1118.
- [21] **Musen MA.** The Protégé project: A look back and a look forward. *AI Matters* 2015; 1(4): 4–12.
- [22] **Roh BM.** Ontology-Based Laser Metamodels and Visualization for Metal-Based Additive Manufacturing. Thesis 2017. https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/16206.
- [23] **Gribova VV, Kleshchev AS, Shalfeeva EA.** Control of Intelligent Systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 2010; 49(6): 952–966.
- [24] **Gribova VV, Shalfeeva EA.** Ensuring the viability of knowledge-based systems [In Russian]. *Information Technologies* 2019; 25(12): 738–746.
- [25] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA, Fedorishchev LA, Shalfeeva EA.** IACPaaS cloud platform for the development of intelligent service shells: current state and development prospects [In Russian]. *Software & Systems* 2018; 31(3): 527–536.
- [26] **Varshavsky PR, Ereemeev AP.** Case-based reasoning modeling in intelligent decision support systems [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making* 2009; 2: 45–57.
- [27] **Heigel JC, Michaleris P, Reutzler EW.** Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti–6Al–4V. *Additive manufacturing* 2015; 5: 9–19.
- [28] **Raghavan A, Wei HL, Palmer TA, DebRoy T.** Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing. *Journal of Laser Applications* 2013; 25(5): 1–8.

About the authors

Gribova Valeria Viktorovna (b. 1965) graduated from the Leningrad Polytechnic University in 1989, Professor's degree (2007). She is the Head of the intelligent systems lab in the Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS, a Vice-President of Russian Association of Artificial Intelligence. She is the co-author of more than 200 publications in the fields of AI, informatics, program technologies and systems. AuthorID (RCI): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; ORCID: 0000-0001-9393-351X; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016. gribova@dvo.ru.

Timchenko Vadim Andreevich (b. 1983) graduated from the Far Eastern State University (Vladivostok-city) (2005), Ph.D. (2011). He is a Senior Researcher at the intelligent systems lab in the Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS. He is the co-author of more than 50 publications in the field of AI, informatics, program models, technologies and systems. AuthorID (RCI): 180470; Author ID (Scopus): 57201774103; ORCID: 0000-0002-1314-7656; Researcher ID (WoS): Q-4380-2016. vadim@dvo.ru.

Received May 22, 2020. Revised May 25, 2020. Accepted June 11, 2020.