



МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО АДДИТИВНОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РЕШЕТЧАТОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Ю.Н. Кульчин, В.В. Грибова, В.А. Тимченко, М.В. Полоник,
Д.С. Пивоваров, Д.С. Яцко, П.А. Никифоров, А.И. Никитин (ИАПУ ДВО РАН)

Представлены результаты исследования аддитивного технологического процесса типа «прямой подвод энергии лазера и порошкового металлического материала», направленного на улучшение механических свойств тонкостенных деталей из листового алюминиевого сплава АМгЗ путем создания на поверхности решетчатой структуры из порошкового материала АК4-1. На основе результатов математического моделирования процесса распространения тепловых полей, образующихся в области взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым материалом, определены параметры лазерного пучка и скорость его перемещения. Создано программное обеспечение, реализующее численные расчеты для представленной математической модели аддитивного процесса. Предложена схема удаленного взаимодействия интеллектуального сервиса поддержки принятия решений операторами установки аддитивного производства с созданным программным обеспечением. Полученные результаты численных расчетов в системе технических вычислений Wolfram Mathematica совместно с экспертной информацией, аккумулированной в портале знаний облачной платформы IACPaas, являются перспективными для обучения и принятия решений операторами лазерного технологического оборудования¹.

Ключевые слова: лазерные технологии, аддитивное производство, лазерное сплавление порошка в процессе нанесения, математическая модель, система поддержки принятия решений.

Введение

Современные тенденции развития технологий машиностроительного производства направлены на решение задач проектирования и создания металлических деталей с высокими механическими свойствами (прочность, жесткость) при минимальном весе. Существующие технологические процессы традиционного (субтрактивного) изготовления деталей ограничивают возможности инженеров и конструкторов в создании легких изделий со сложной геометрией и многофункциональными конструктивными возможностями. Быстро развивающиеся технологии лазерного аддитивного производства (АП) металлических деталей могут обеспечить большую гибкость при изготовлении изделий со сложной структурой и дать инженерам больше свободы для изготовления новых решетчатых/сотовых структур со сложной геометрией [1, 2].

Проблема повышения жесткости и прочности тонкостенных корпусных деталей без значительного увеличения их массы может быть решена путем армирования поверхности.

Качество трехмерных металлических изделий, созданных по технологии АП «прямой подвод энергии и материала» (directed energy deposition - DED) (ГОСТ Р 57558-2017) с использованием мощного лазерного излучения, формируется в два этапа.

Первый этап характеризуется принятием правильного технического решения оператором технологического комплекса при выборе режимов работы лазерного, роботизированного и вспомогательного оборудования с учетом теплофизических характеристик обрабатываемого металла. Задача создания физического объекта в соответствии с его цифровой геометрической моделью путем наплавки слоя за слоем порошкового материала заключается в том, что оператор на данном этапе выполняет математический расчет распределения температурного поля по поверхности и по глубине наплавляемого материала. При этом полученные значения основных параметров оборудования должны исключать случаи интенсивного объемного кипения и испарения, которые могут привести к выбросу металла из зоны расплава и возникновению структурных дефектов осажденного слоя.

Второй этап создания качественных объемных металлических изделий с использованием технологии DED, удовлетворяющих требованиям нормативной и конструкторской документации, характеризуется проблемой поддержания значений расчетных параметров в течение всего времени аддитивного процесса.

Известно [3], что мониторинг процессов DED осуществляется в трех направлениях:

¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-01-00449.

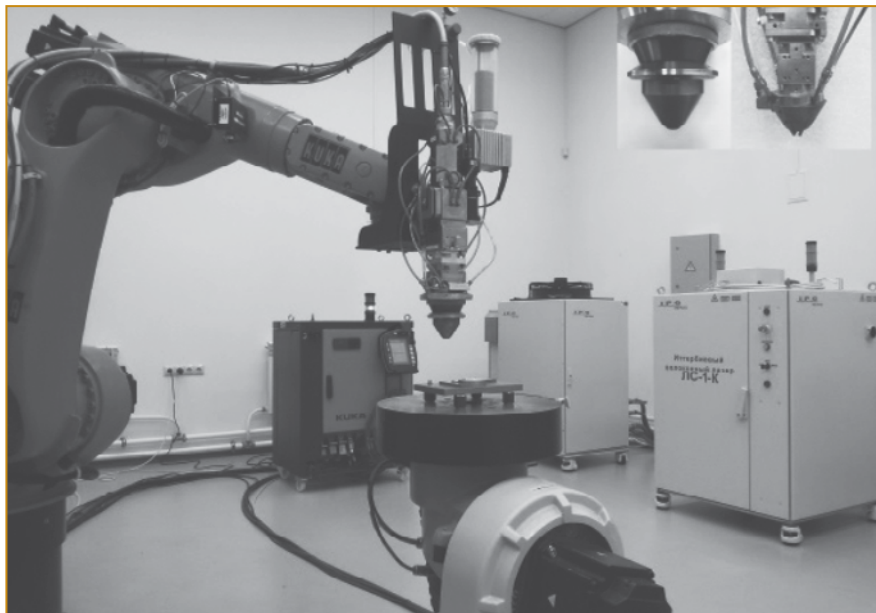


Рис. 1. Установка АП и вспомогательное оборудование, используемое для лазерного аддитивного производства

IACPaaS		Лазерное аддитивное производство	Онтология (15) ↑
О платформе	Переводы		Онтология базы технологических лазеров
Новости	Онтологии		Онтология базы металлпорошковых композиций
Фонд	Агенты		Онтология базы технологических газов
Личный кабинет	Решатели		Онтология базы прецедентов
Мой Фонд		<ul style="list-style-type: none"> база документированных технологических процессов база технологических газов база прецедентов база знаний о настройках режимов лазерного аддитивного производства база порошковых питателей база оборудования для перемещения рабочего инструмента система единиц физических величин база технологических насадок для процессов лазерной обработки классы процессов лазерной обработки справочник по материалам база оптических головок база дефектов металла 	<ul style="list-style-type: none"> Онтология технологических процессов лазерной обработки Онтология баз знаний о настройках режимов лазерной обработки Онтология базы порошковых питателей Онтология базы оборудования для перемещения рабочего инструмента Онтология системы единиц физических величин Онтология базы технологических насадок для процессов лазерной обработки Онтология классификации процессов лазерной обработки Онтология справочника по материалам Структура описания характеристик Онтология базы лазерных оптических головок Онтология базы дефектов металла
Работающие Сервисы			
Совместный Доступ			
Рассмотрение Запросов			
Мои Запросы			
Сообщения			
Профиль			

Рис. 2. Портал знаний о технологических процессах лазерного аддитивного производства

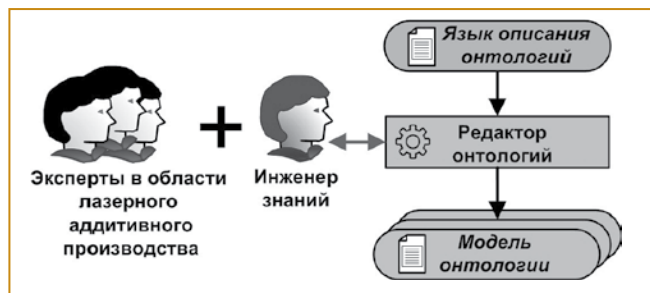


Рис. 3. Схема использования инструментального средства «Редактор онтологий» для создания онтологий

- мониторинг расплава;
- контроль скорости подачи порошка;
- мониторинг морфологии слоев.

Цель данной статьи - представить результаты исследования процесса принятия технических

решений оператором системы лазерного аддитивного производства (СЛАП) при формировании периодической решетчатой структуры на поверхности тонкостенной пластины из алюминиевого сплава.

Материал и методы

Создание периодической решетчатой структуры с заданными размерами ячеек на поверхности тонкостенной пластины из алюминиевого сплава АМг3 осуществлялось с использованием СЛАП по технологии DED. Реализация аддитивных процессов осуществлялась под управлением программного обеспечения (ПО) лазерного и роботизированного оборудования.

Оборудование, материалы и программное обеспечение

Основным оборудованием в СЛАП, реализующим процесс DED, в котором энергия внешнего источника лазерного излучения используется для соединения металлических порошковых материалов путем их сплавления в процессе нанесения, является мощный иттербиевый волоконный лазер и промышленный робот-манипулятор. Для создания периодической решетчатой структуры на поверхности тонкостенной пластины из алюминиевого сплава использовалась система АП Центра лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН (рис. 1).

Лазерное оборудование: мощный волоконный лазер непрерывного излучения LC-1-K (производство IPG Photonics Corporation - IPG IRE-Polus), длина волны 1,07 мкм. Оптическая головка IPGP FLW-D50 с модулем подачи порошка PRECITEC 4W «четырёхпоточное сопло».

Программируемое перемещение оптической головки IPGP FLW-D50 осуществлялось с помощью шестиосевого промышленного робота KUKA KR30NA. Для подачи металлического порошкового материала в зону сплавления использовался порошковый питатель ПП-7103 производства компании «Плазмаавтоматика».

Управление промышленным роботом KUKA KR30NA и волоконным лазером LC-1-K осуществлялось с помощью ПО KUKA ExpertTech 3.2, KUKA LaserTech 3.0 и LaserNet.

Серия численных расчетов температурных полей и границ ванны расплава выполнена с использованием

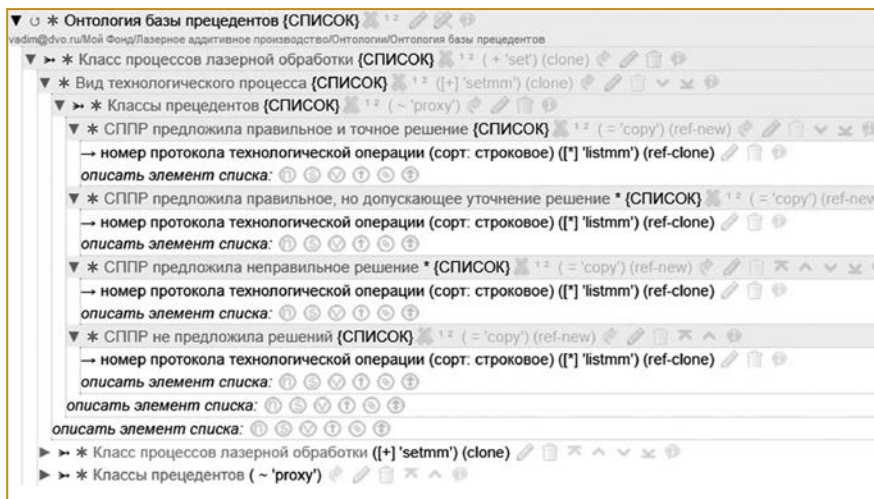


Рис. 4. Онтология базы прецедентов

системы технических вычислений Wolfram Mathematica 11.3.

Цифровая модель одной линии решетчатой структуры создана с использованием ПО SolidWorks (SolidWorks Campus 500).

Исследование микроструктуры осажденного материала проводилось с использованием следующего оборудования:

- установка ионного травления IM4000 (Hitachi, Япония);
- растровый электронный микроскоп S-3400N (Hitachi, Япония) - использовался режим визуализации обратно рассеянных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ;
- микротвердомер ПМТ-3М (ЛОМО, Россия) - микротвердость определяли по методу Виккерса, с нагрузкой 0,98 Н.

Одной из основных проблем лазерного аддитивного производства является выбор (правильная установка) технологических параметров лазерного аддитивного процесса. С целью уменьшения числа ошибок на этапе проектирования производства деталей из металлопорошковых композиций разрабатывается система интеллектуальной поддержки операторов СЛАП. Ее реализация возможна с использованием методов искусственного интеллекта [4, 5].

Авторами предлагается гибридный подход к интеллектуальной поддержке операторов, основанный на использовании методов инженерии знаний, поиска по аналогии на основе прецедентов и индуктивного обобщения данных [6]. Важной задачей является накопление информации в едином технологическом пространстве для ее дальнейшего использования операторами лазерного оборудования. С этой целью разработан портал знаний о технологических процессах (операциях) ЛАП (рис. 2).

Портал создан на облачной платформе IASPaas (<https://iaspaas.dvo.ru>) и включает информационные и программные компоненты. Информационными

компонентами портала знаний являются набор баз данных и справочников, используемых в АП, база прецедентов, база знаний по настройкам режимов СЛАП, а также набор онтологий, на основе которых формируются базы данных, знаний и прецедентов.

Базы данных содержат информацию о компонентах СЛАП (технологические лазеры, лазерные оптические головки, оборудование для перемещения лазерных оптических головок, например, промышленные роботы и т.д.), а также об обрабатываемых (расходных) материалах для ЛАП (металлические порошки и технологические газы). База знаний

содержит формально представленные связи между составом и свойствами обрабатываемых деталей, составом и свойствами наплавляемых порошковых материалов, режимом наплавки (набором регулируемых параметров процесса), а также газовой средой, которая должна быть при этом обеспечена, и свойствами конечных деталей. База прецедентов содержит набор формализованных протоколов технологических операций, структурированных по группам в зависимости от результатов их выполнения.

К программным компонентам портала относятся редакторы для создания и сопровождения баз данных и знаний, а также система поддержки принятия решений (СППР), основанная как на знаниях, так и на прецедентах.

На сегодняшний день разработан ряд информационных и программных компонентов, ведется работа по созданию новых и совершенствованию существующих компонентов. Так, разработан набор моделей онтологий для унифицированного и стандартизированного (включая терминологическую согласованность) описания следующих баз данных и знаний: базы оборудования и расходных материалов для АП, базы формализованных протоколов технологических операций (прецедентов), базы знаний по настройкам режимов СЛАП.

Для формального представления онтологий используется язык описания онтологий облачной платформы IASPaas. Для создания онтологий в Фонде (структурированном хранилище) платформы используется инструментальное средство платформы «Редактор онтологий» (рис. 3).

На рис. 4 представлен пример интерфейса средства «Редактор онтологий», который используется для формирования онтологии базы прецедентов в Фонде платформы IASPaas.

Разработаны редакторы для формирования и сопровождения баз данных, знаний и прецедентов, управляемые соответствующими онтологиями (рис. 5).

Таблица 1. Алюминиевый сплав системы алюминий-магний (Al-Mg) АМгЗ, массовая доля элементов, %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие элементы		Al
								каждый	сумма	
0,5...0,8	0,5	0,1	0,3...0,6	3,2...3,8	0,05	0,2	0,1	0,05	0,1	основа

Плотность – 2,66 кг/дм³.

Таблица 2. Химический состав в % порошка АК4-1

Элементы	Фактически, % масс.	Норма по ГОСТ 4784-2019, %
Al	баланс	основа
Si	0,14	0,35
Fe	0,94	0,8...1,4
Cu	2,1	1,9...2,7
Mn	0,04	0,2
Mg	1,34	1,2...1,8
Cr	0,01	0,1
Zn	0,01	0,3
Ti	0,08	0,02...0,1
Ni	1,23	0,8...1,4

Размер частиц основной фракции – 100...120 мкм.
Содержание основной фракции - > 90% по массе.
Плотность - 2,80 кг/дм³.

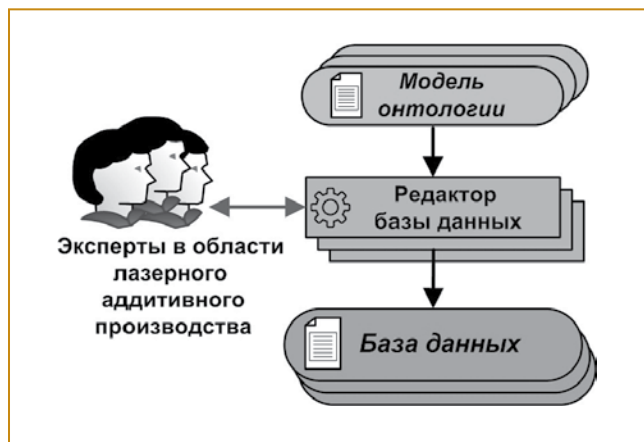


Рис. 5. Управляемые онтологиями редакторы баз данных компонентов СЛАП и материалов АП

Таблица 3. Теплофизические характеристики образца алюминиевых сплавов АМгЗ и АК4-1 при температуре T_0

№	Теплофизические характеристики	Обозначение	АМгЗ значения параметров	АК4-1 значения параметров	Единицы измерения
1	Плотность материала	ρ	2670	2770	кг/м ³
2	Теплоемкость	c	880	797	Дж/(кг·°С)
3	Теплопроводность	k	151	146	Дж/(кг·°С)
4	Температуропроводность	$a=k/(c\rho)$	$6,427 \cdot 10^{-5}$	$6,613 \cdot 10^{-5}$	м ² /с
5	Размер наплавляемой линии				
	высота	h	0,002	0,000143 · 16 слоев	м
	длина	d	0,1	0,05	м
	ширина	b	0,07	0,0009	м
6	Начальная температура	T_0	100	100	°С
7	Температура плавления	T_p	639	645	°С
8	Температура кипения металла	T_k	2518	2518	°С
9	Коэффициент поверхностного поглощения лазерного излучения при длине волны 1,0 мкм	A	0,45	0,45	

Примечание. Измеренный коэффициент поглощения поверхности алюминиевого сплава АМгЗ на длине волны 1,0 мкм при комнатной температуре [8] составил 0,25. Учитывая, что начальная температура процесса лазерной обработки составляет 100° С, на основании экспертной оценки коэффициент поверхностного поглощения лазерного излучения в алюминиевом сплаве АМгЗ в данном эксперименте принимается равным 0,45.

Редакторы автоматически адаптируются к изменениям в онтологиях.

С использованием редакторов в настоящее время формируются все информационные базы. Например, на рис. 6 показан интерфейс редактора для формирования базы данных (в соответствии с онтологией базы

технологических лазеров), содержащей информацию о ключевых параметрах таких компонентов СЛАП, как технологические лазеры.

К таким параметрам относятся, например, длина волны лазерного излучения, режим лазерного излучения (непрерывный, с модуляцией, импульсный),

Таблица 4. Значения параметров лазерной обработки

№	Параметры лазерной обработки	Обозначение	Значения параметров	Единицы измерения
1.	Радиус лазерного пятна	r_0	0,00045	м
2.	Мощность лазерного излучения	P_0	650	Вт
3.	Скорость перемещения лазерного пучка по поверхности	v	0,012	м/с

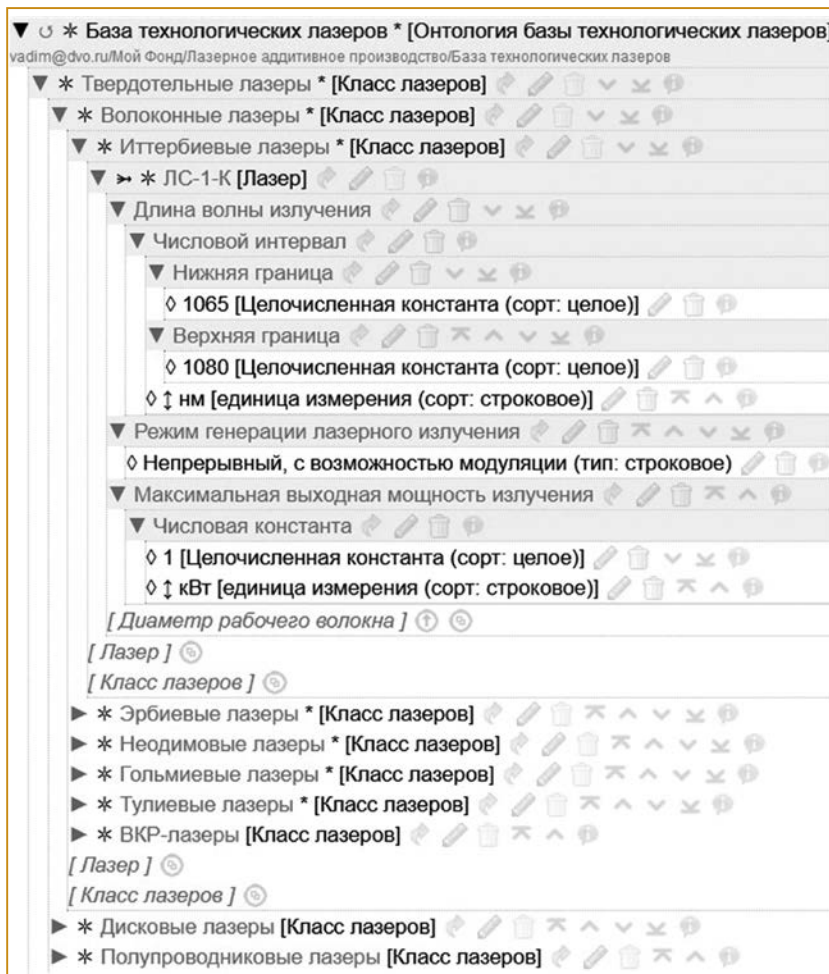


Рис. 6. Фрагмент базы технологических лазеров

максимальная мощность источника лазерного излучения и некоторые другие.

Материалы для аддитивного производства

Периодическая решетчатая структура на поверхности тонкой пластины из сплава АМг3 (табл. 1) создана из металлического порошка на основе алюминия АК4-1 (табл. 2). Порошок из сплава АК4-1 произведен на предприятии "СфераМ" (<https://sferam74.ru>) путем распыления жидкого металла. Форма и размер частиц металлического порошка из сплава АК4-1 представлены на рис. 7.

С учётом того, что алюминий очень чувствителен к окислению при плавлении, в качестве защитного и

несущего газа использовался инертный газ гелий (He), обладающий высоким значением коэффициента теплопроводности.

Проектирование и расчет параметров лазерного аддитивного процесса

Проектирование решетчатой структуры на поверхности тонкостенной пластины проводилось в два этапа.

На первом этапе был проведен расчет энергетических параметров для создания одной линии решетки (рис. 8). Для этого использовались математические модели, отражающие физические процессы образования пор и дефектов, скорость движения поверхностей фаз, гидродинамику потока и распределение тепловых полей [7].

На втором этапе, используя полученные результаты расчета, на поверхности пластины толщиной 2,0 мм была сформирована одна линия из металлического порошка АК4-1.

Расчет параметров лазерного аддитивного процесса для одной линии

На основании теплофизических характеристик материалов (табл. 3) и параметров лазерной обработки табл. 4, определенных экспертным путём, был выполнен расчет аддитивного построения единичной линии (рис. 8) на поверхности пластины из алюминиевого сплава АМг3 толщиной 2,0 мм.

Для определения параметров температурного поля, ванны расплава и высоты наплавленного слоя из порошка АК4-1, предложен двухэтапный алгоритм моделирования и численные расчеты.

При исследовании влияния параметров аддитивного технологического процесса «прямой подвод энергии лазера и порошкового металлического материала» на структуру формируемого материала решетки установлено, что предварительный нагрев подложки до температуры $T_0=100\pm 20^\circ\text{C}$ позволяет получить более благоприятную, в частности, более однородную, структуру наплавленного металла. Кроме того, данное технологическое решение позволяет снизить склонность наплавленного материала к растрескиванию и уменьшить пористость.

На первом этапе для подложки АМг3 рассчитаны границы температурного поля расплава. Нагрев подложки лазерным излучением описывался

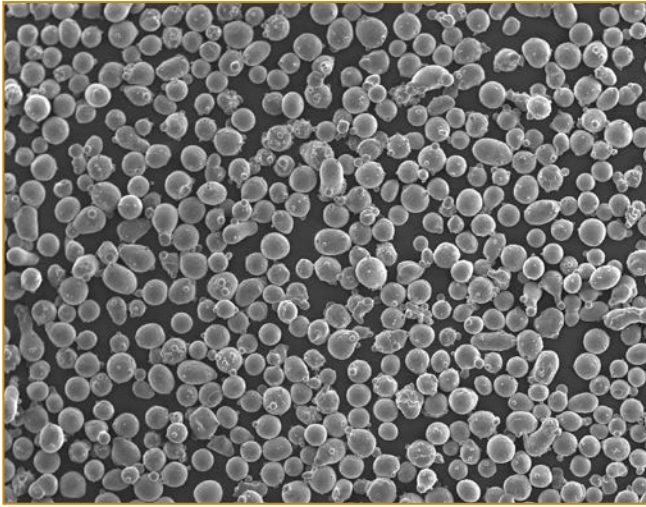


Рис. 7. Форма и размер порошкового материала АК4-1, используемого для создания решетчатой периодической структуры

дифференциальным уравнением теплопроводности [9], а граничное условие на поверхности задает влияние поверхностного источника лазерной энергии:

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \nabla^2 T(r, z, t), \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} (1-R)q(r, t), & r \leq r_0 \\ 0, & r > r_0 \end{cases},$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ - радиальное расстояние от точки облучаемой поверхности до оси лазерного пучка, $\{x, y, z\}$ - декартовы прямоугольные координаты с началом координат в центре лазерного пятна на поверхности материала, ось z совпадает с осью лазерного луча, перпендикулярной нагреваемой поверхности и направленной вглубь материала, ∇^2 - оператор Лапласа, t - время, $q(r, t)$ - плотность мощности излучения на поверхности тела, R - коэффициент отражения металла в зоне воздействия лазерного излучения, $(1-R) = A$, $(1-R)q(r, t)$ - поглощенный удельный поток излучения, k - теплопроводность материала.

В соответствии с (1), исходя из теплофизических характеристик материалов (табл. 3) и выбранных режимов обработки (табл. 4), решение строится согласно [9] при условии, что $\partial T(r, z, t) \Big|_{r=\infty} = \partial T(r, z, t) \Big|_{z=\infty} = \partial T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0$, $q(r) = q_{\max} e^{-r^2/r_0^2}$, $q(t) = \text{const}$ на поверхности облучаемого материала и в глубине облучаемого материала соответственно:

$$T(r, z, t) = 2A\sqrt{atk}^{-1} q_{\max} e^{-r^2/r_0^2} + T_0, \quad r \neq 0, \quad z = 0, \quad (2)$$

$$T(r, z, t) = 2A\sqrt{atk}^{-1} q_{\max} e^{-r^2/r_0^2} \operatorname{erfc}[z/(2\sqrt{at})] + T_0, \quad (3)$$

$$r \neq 0, \quad z \neq 0.$$

$$\text{В уравнениях (2) и (3)} \quad q_{\max} = P_0 / \int_0^{r_0} 2\pi e^{-r^2/r_0^2} r dr -$$

максимальное значение плотности мощности лазерного излучения (нормальное распределение), P_0 - мощность излучения, T_0 - начальная температура облучаемого тела, r_0 - радиус пятна лазерного луча, α - коэффициент теплопроводности материала, $\operatorname{erfc}[z/(2\sqrt{at})]$ - интеграл дополнительной функции от интеграла функции ошибки.

Аддитивность зависимостей (2) и (3) позволяет определить температурное поле и границу расплава при прохождении лазерного пучка по поверхности материала с заданной скоростью v . Руководствуясь значениями теплофизических свойств используемых материалов (табл. 3) и значениями параметров лазерной обработки (табл. 4), проведена серия численных расчетов в системе технических вычислений Wolfram Mathematica 11.3. Результаты представлены на рис. 9. Глубина ванны расплава формируется в тонком слое образца $13,5 \cdot 10^{-5}$ м, при этом температура поверхности материала не должна превышать (в нашем случае - не превышает, см. рис. 10) температуру кипения T_b . Ширина (диаметр) ванны расплава на поверхности пластины составляет $\sim 0,00045 \times 2 = 0,0009$ м.

На втором этапе решается задача добавления слоя порошка на заготовку в образовавшуюся ванну расплава рис. 9, шаг 2. Новый осажденный слой создает новый объект на предыдущем, который ограничен пересечением потока порошка и ванны расплава. Для каждого нового осажденного слоя во времени его высота составляет: $\Delta h = mv_1 \Delta t / (\pi r_0^2 \rho_c)$, где Δh - толщина осажденного слоя за истекшее время Δt , v_1 - скорость потока порошка, πr_0^2 - площадь нанесения порошка, ρ_c - плотность порошка.

Предполагается, что добавленный слой совпадает с температурой под слоем. Считаем, что за один проход лазерного пучка толщина образующегося осажденного слоя достаточно мала $\sim 0,143$ мм (табл. 3), а материал слоя равномерно распределен по площади ванны расплава (рис. 9, шаг 2). Также предполагается, что порошок поступает в ванну расплава уже в расплавленном состоянии, что позволяет использовать в расчетах теплофизические характеристики порошкового материала сплава АК4-1.

Затем, повторяя шаг 1, получаем новый температурный профиль комбинированной детали и слоя порошка (рис. 10, шаг 3). Температурные поля в новом слое, рассчитанные в соответствии с (1), представлены на рис. 10.

Расчетная глубина ванны расплава составляет $13,3 \cdot 10^{-5}$ м. Расчетная температура на поверхности материала - 1880°C , то есть с увеличением материала наплавки происходит увеличение температуры расплавленного металла. Если значение температуры расплава превышает $T_b = 2518^\circ \text{C}$ (табл. 3), то происходит интенсивное объемное кипение и испарение, что

Таблица 5. Значения микротвердости исследуемых образцов, [HV]

Образцы	Точки контроля					Среднее значение
Образец № 1 (рис. 11)	110,1	100,8	107,2	103,5	103,0	103,6±2,30
Образец № 2 (рис. 12)	126,7	132,9	134,3	118,1	134,3	129,3±6,30

приведет к выбросу металла из зоны расплава и появлению структурных дефектов в наплавляемом слое.

Лазерная наплавка элемента решетки - отдельной линии

Расчеты показали, что на этапе определения параметров изготовления одной линии решетки (рис. 8) целесообразно уменьшить выбранную ранее мощность лазерного излучения (табл. 4).

Параметры системы АП при изготовлении одной линии на поверхности тонкостенной пластины из алюминиевого сплава

Мощность лазерного излучения, Вт.....630
 Расход газа (He), л/мин.....30
 Расход металлического порошка, г/мин.....2,2
 Скорость перемещения лазерного луча по поверхности, м/с.....0,012
 Шаг перемещения вдоль оси Z, мм.....0,13
 Начальная температура подложки, °C.....100±20

По завершению процесса наплавки одной линии ее качество оценивалось путем исследования микроструктуры.

Для сравнения на рис. 11 представлена микроструктура образца, изготовленного из алюминиевого деформируемого сплава АК4-1.

Проведенный анализ микроструктуры образцов показал, что материал, полученный методом лазерно-порошковой наплавки из порошка АК4-1 (рис. 11), имеет гораздо более дисперсную структуру, чем сплав, полученный по стандартной технологии (рис. 12).

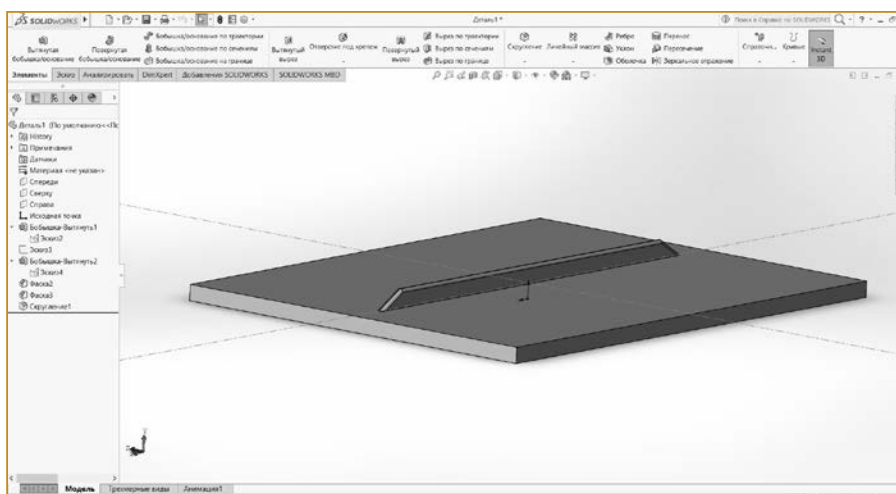


Рис. 8. Цифровая модель одной линии, разработанная для расчета процесса формирования решетчатой структуры

В табл. 5 приведены значения микротвердости по Виккерсу образцов (рис. 11, 12) при температуре 23±2° С.

Учитывая, что сплав (образец № 1, рис. 11), полученный с помощью аддитивного процесса DED, не подвергался термообработке, закалке (Т) или искусственному старению, измеренное значение микротвердости (табл. 5) можно считать приемлемым.

Построение решетчатой периодической структуры на поверхности пластины из алюминиевого сплава

На основании результатов расчета параметров аддитивного технологического процесса «прямой подвод энергии лазера и порошкового металлического материала» и результатов эксперимента по созданию отдельной линии с рассчитанными параметрами, с учетом положительной оценки микроструктуры полученного материала (табл. 5), на поверхности тонкостенной алюминиевой пластины (сплав АМг3) создана периодическая решетчатая структура из металлического порошка АК4-1 (рис. 13).

Дополнительная информация к процессу создания решетчатой структуры (рис. 13):

- число осаждаемых слоев в одной линии – 16 ед.;
- диаметр лазерного пятна на обрабатываемой поверхности - 0,9±0,1 мм;
- длина одной линии наплавки - 60,0±3,0 мм;
- расстояние между линиями - 11,0±0,2 мм;

Создание периодической решетчатой структуры с заданными размерами ячеек на поверхности тонкостенной пластины из алюминиевого сплава АМг3 выполнено с помощью СЛАП (рис. 1).

Обсуждение результатов исследования

Представленная методология проектирования технологического DED процесса демонстрирует подход к проблеме задания значений ключевых параметров оборудования при создании объемной периодической структуры из металлического порошка на поверхности тонкостенного металла.

На первом этапе, учитывая теплофизические свойства используемых материалов и характеристики оборудования, оператор

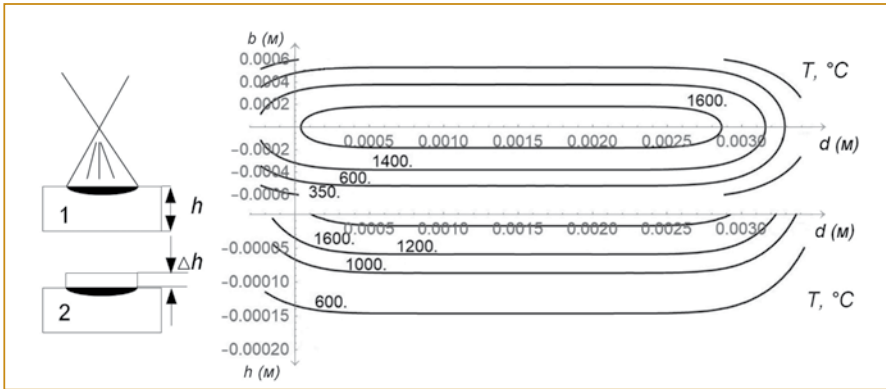


Рис. 9. Распределение температуры на поверхности и в глубине алюминиевого сплава АМг3 при установившемся равномерном процессе движения лазерного пучка по поверхности - шаг 1. Шаг 2 схематично представляет собой добавление порошкового сплава АК4-1 в образовавшуюся ванну расплава

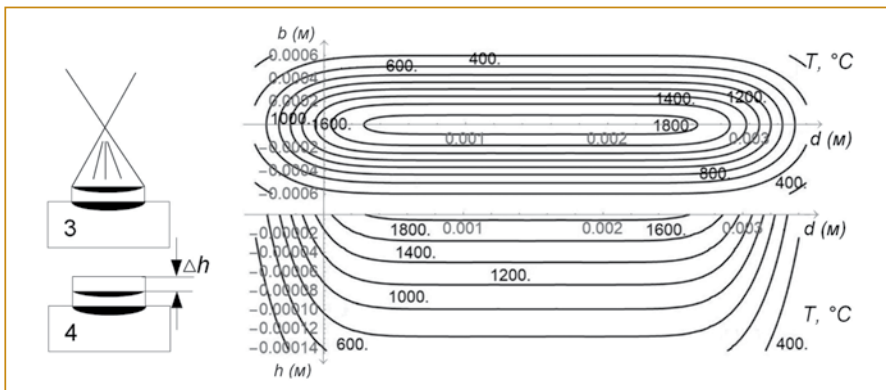


Рис. 10. Распределение температуры на поверхности и в глубине добавленного порошкового сплава АК4-1 во время установившегося и равномерного процесса лазерной наплавки - шаг 3. Шаг 4 схематично представляет добавление порошкового сплава АК4-1 во вновь образованную ванну расплава

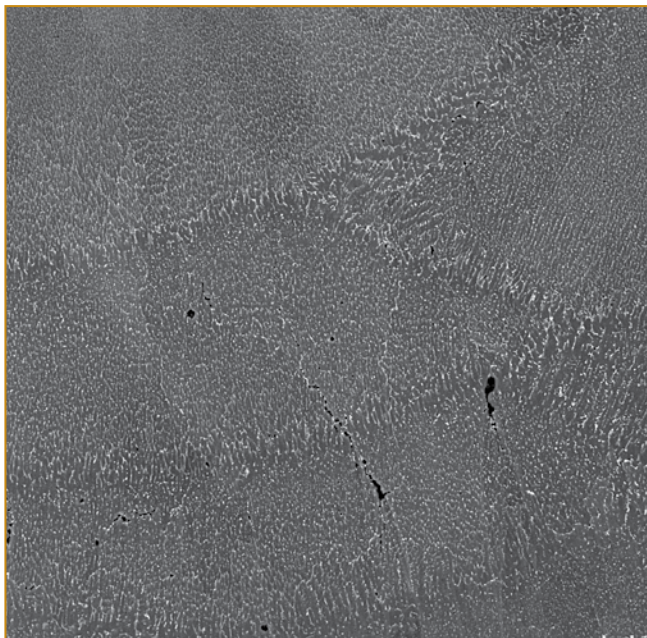


Рис. 11. Микроструктура материала, полученного из порошка АК4-1 методом лазерной послойной наплавки (увеличение 200 \times)

рассчитывает параметры СЛАП. По результатам серии численных расчетов температурных полей и границ ванны расплава оператор принимает решение о правильности энергетических параметров внешнего лазерного источника по критерию текущего значения температуры расплава: $T_k > T(r, z, t) > T_p$.

Для исследования возможности взаимодействия СППР (входящей в состав портала знаний) с программными средствами моделирования и численных расчетов термодинамических процессов (сопровождающих технологию послойного лазерного сплавления металлических порошков) предложена схема использования программного алгоритма расчета параметров температурного поля, ванны расплава и высоты осажденного слоя из порошка АК4-1 (рис. 9, 10). Схема основана на технологии взаимодействия сервисов платформы IASaaS с внешним (по отношению к облачной платформе) программным обеспечением. Программная реализация алгоритма (внешнее ПО) представляет собой скрипт на языке Wolfram Language системы Wolfram Mathematica 11.3 (рис. 14).

Связующее программное обеспечение включает Web-сервер, шлюз FastCGI для определенного языка программирования и приложение на этом языке. Такое приложение (программа-оболочка) реализует запуск скрипта Wolfram Language с передачей ему данных - теплофизических характеристик используемых материалов и параметров лазерной обработки (табл. 3 и 4), полученных от СППР через Web-сервер, и возвратом результатов работы скрипта Web-серверу (который перенаправит его обратно в СППР).

Для реализации этого механизма использовано программное средство (Web-сервер), реализующее обработку HTTP-запросов (Apache HTTP Server), и шлюз FastCGI, на языке программирования которого разработана программа-оболочка. Затем они устанавливаются и интегрируются на узле, доступном через Internet, на котором установлена система Wolfram Mathematica 11.3. Язык программирования PHP используется в качестве реализации FastCGI, поскольку имеет высокоуровневые методы обработки HTTP запросов и запуска исполняемых файлов приложений.

Наш ум - это металл, извлеченный из формы, а форма - это наши действия.

Анри Бергсон

Второй этап - проверка принятых параметров СЛАП. После изготовления фрагмента детали с заданной геометрической формой исследуются необходимые свойства полученного сплава.

Если основная геометрическая форма и свойства полученного материала соответствуют заданным требованиям технического задания, оператор переходит к следующему этапу, в нашем случае, к созданию трехмерной периодической структуры из металлического порошка на поверхности тонкостенного металла.

Третий этап - создание физического пространственного продукта путем последовательного добавления металлического порошкового материала. На практике контроль соответствия основных рабочих свойств детали, полученной в процессе DED, осуществляется с использованием средств неразрушающего контроля.

По окончании изготовления детали оператор системы СЛАП составляет протокол, который служит источником экспертной информации в дальнейшей работе.

Результаты исследования, в частности, формализованный протокол технологической операции формирования решетчатой периодической структуры на поверхности алюминиевого сплава АМг3, аккумулируются в соответствующих базах данных портала знаний и служат для пополнения базы прецедентов.

База прецедентов будет использоваться для выполнения поиска по аналогии, а также для формирования базы знаний с использованием индуктивных методов обобщения данных (когда объем базы прецедентов станет достаточным для обучения). Таким образом, постоянное накопление информации в едином технологическом пространстве является важной задачей.

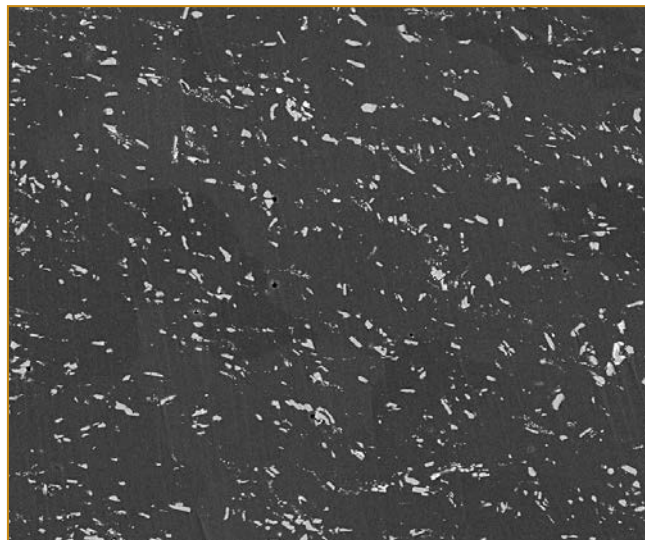


Рис. 12. Типичная структура алюминиевого деформируемого сплава АК4-1 (поперечное сечение, увеличение 200^x)

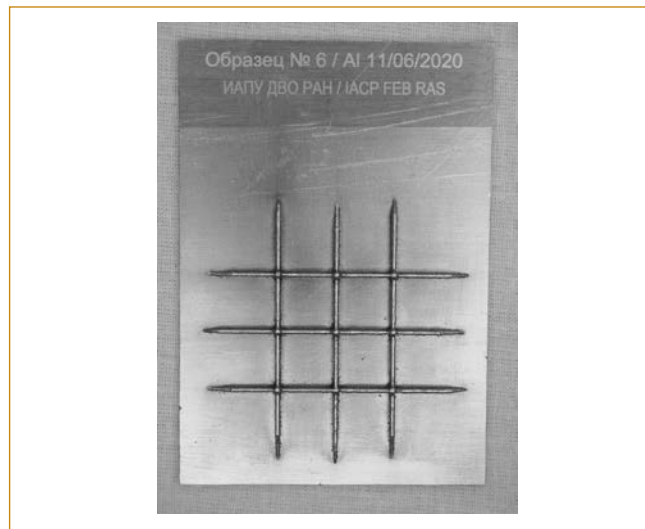


Рис. 13. Периодическая структура решетки из металлического порошка АК4-1 на поверхности тонкостенной пластины из алюминиевого сплава АМг3

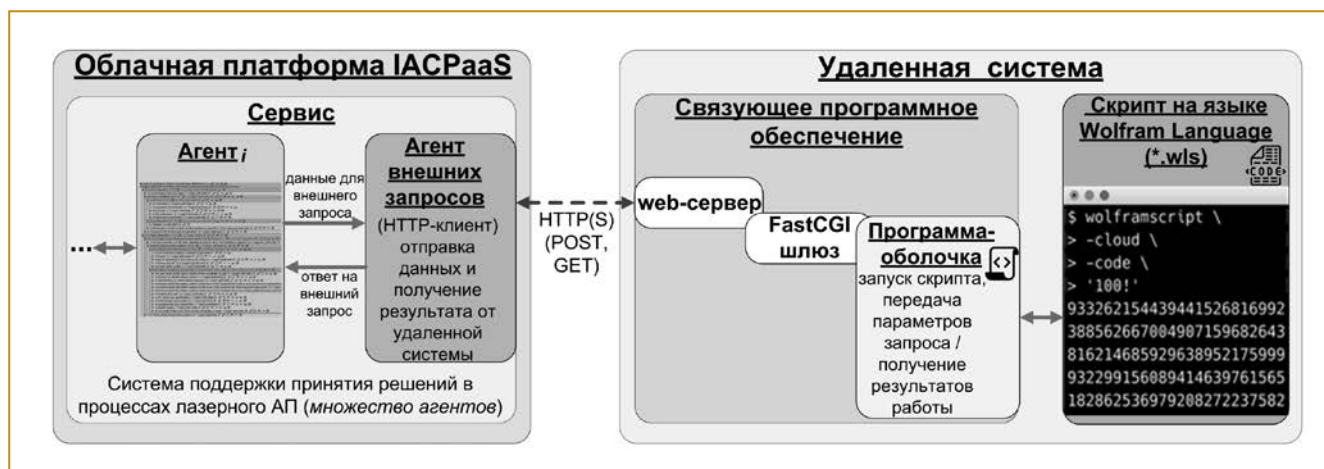


Рис. 14. Схема удаленного взаимодействия сервиса облачной платформы IACPaaS (СППР) со скриптом на языке Wolfram Language

Выводы

Представленная методология проектирования лазерного аддитивного процесса формирования решетчатой периодической структуры на поверхности пластины из алюминиевого сплава является частью исследований, направленных на изучение способов комбинирования матричных и армирующих элементов, формируемых в зоне интенсивного взаимодействия лазерного излучения с композитной системой.

Портал знаний на облачной платформе IACPaas аккумулирует информацию о технологических операциях ЛАП в едином технологическом пространстве. Это облегчает доступ к этой информации для всего заинтересованного сообщества. Набор инструментов и технологий, предоставляемых платформой, использование онтологического подхода позволяют специалистам лазерного АП формировать и совершенствовать базы данных и базу знаний в понятной им концептуальной структуре и терминологии, а также оказывать интеллектуальную поддержку операторам СЛАП.

Базы данных и знаний портала будут полезны в процессе обучения операторов лазерного технологического оборудования, а формализованное представление знаний и данных обеспечит возможность использования этой информации программными системами поддержки принятия решений.

Результаты данной работы планируется использовать для эффективной эксплуатации дорогостоящего высокотехнологичного оборудования и сырья, снижения числа ошибок, повышения производительности и уровня автоматизации труда инженеров-

технологов и операторов лазерного технологического оборудования.

Список литературы

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. Springer: New York. USA. 2010. 447 p.
2. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms // International Materials Reviews. 2012. 57(3). P 133–164.
3. Bian L., Shamsaei N., Usher J. M. Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2018. 328 p.
4. Sanfilippo E.M., Belkadi F., Bernard, A. Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing // Computers in Industry, vol. 109. 2019. pp. 182–194.
5. Wang Yuan Bin, Zheng Pai, Peng Tao, Yang Hua Yong, Zou Jun Smart additive manufacturing: Current artificial intelligence-enabled methods and future perspectives // Science China Technological Sciences. 63(9). 2020. pp. 1600–1611.
6. Gribova V., Kulchin Y., Nikitin A., Timchenko V. The Concept of Support for Laser-Based Additive Manufacturing on the Basis of Artificial Intelligence Methods // Lecture Notes in Computer Science. 2020. vol. 12412. Pp. 403–415.
7. Yatsko D.S., Polonik M.V., Dudko O.V. Optimization of fiber laser parameters at local high-temperature exposure to metal. Proc. SPIE. 10176. Asian-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics. 1017624. 2016.
8. Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Субботин Е.П. Лазерная подводная очистка корпусов морских судов // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7. № 4. С. 86–101.
9. Малашенко А.А., Мезенов А.В. Лазерная сварка металлов. М.: Машиностроение. 1984. 44 с.

Кульчин Юрий Николаевич – академик РАН, д-р физ.-мат. наук, научный руководитель Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения

Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН), **Грибова Валерия Викторовна** – д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе ИАПУ ДВО РАН, **Тимченко Вадим Андреевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **Полоник Марина Васильевна** – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,

Яцко Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник,

Никифоров Павел Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

Никитин Александр Иванович – ведущий инженер ИАПУ ДВО РАН.

E-mail: kulchin@iacp.dvo.ru, gribova@iacp.dvo.ru, vadim@dvo.ru, polonik@mail.ru, diamante_gdi-1@mail.ru, d.s.yatsko@mail.ru, nikiforova@gmail.com, anikitin@iacp.dvo.ru

Система учета нефтепродуктов Дельта-Торг

Компанией «КРУГ» завершён первый этап модернизации системы измерения количества и показателей качества нефтепродуктов (СИКН) нефтебазы «Дельта-Торг» (г. Пенза) для введения системы обработки информации (СОИ) в соответствие современным нормативным требованиям, в том числе нормативным документам слающей стороны – АО «Транснефть-Дружба».

СИКН разработана с применением системы измерений количества и показателей качества нефти компании «КРУГ». Произведена поставка резервируемых АРМ оператора с обновленным системным ПО, включая SCADA КРУГ-2000 вер. 4.3 и совместимое с ней антивирусное ПО – Kaspersky Industrial CyberSecurity (KICS).

Для синхронизации времени всех абонентов системы был установлен сервер единого времени TimeVisor.

Совместно с ВНИИР – филиалом ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» проведено тестирование и получено Свидетельство о метрологической аттестации SCADA-системы КРУГ-2000.

На втором этапе модернизации запланирована замена физически и морально устаревших импортных контроллеров расхода новейшими российскими резервируемыми вычислителями расхода нефти ЦифрОйл. Далее будет проведена сертификация СИКН «Дельта-Торг» в связи с изменениями в структуре при модернизации.

[Http://krug2000.ru](http://krug2000.ru)