АДЛИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.3.212.219

Многоуровневое моделирование рабочих процессов селективного лазерного сплавления

- А.С.Борейшо^{1,2}, Г.Т.Джгамадзе¹, А.А. Моисеев²,
- А.В. Савин^{1, 2}, П.Г. Смирнов²
- ¹ Акционерное общество «Лазерные системы», Санкт-Петербург, Россия
- ² Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Селективное лазерное сплавление (СЛС) является перспективным направлением аддитивных технологий. Проблема контроля микроструктуры и качества конечного изделия, получаемая методом СЛС, решается подбором режимов плавления с помощью экспериментального поиска или численного моделирования. На сегодняшний день сформировалась многоуровневая методология моделирования СЛС-процессов, которая и рассматривается в настоящей работе.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, математическая модель, микроуровневое моделирование, мезоуровневое моделирование, многоуровневое моделирование, цифровой двойник

> Статья получена: 08.04.2022 Статья принята: 20.04.2022

введение

Широкое распространение получила технология послойного изготовления трехмерных физических объектов. Технология, которая представляет собой сплавление микрочастиц металлического порошка с использованием в качестве источника тепла мощного лазерного излучения, именуется технологией селективного лазерного сплавления (СЛС) [1]. Она позволяет создавать практически

Multilevel Simulation of Selective Laser Melting Operational Processes

- A. S. Boreysho^{1,2}, G. T. Dzhgamadze¹, A. A. Moiseev², A. V. Savin^{1,2}, P. G. Smirnov²
- ¹ Lazer Systems Joint Stock Company, Saint-Petersburg, Russia
- ² VOENMEKH Ustinov Baltic State Technical University, Saint-Petersburg, Russia

Selective laser melting (SLM) is a promising area in additive processes. The problem of controlling the microstructure and quality of the final product obtained by the SLS method is solved by selecting the melting modes using the experimental search or numerical modeling. As of today, a multilevel simulation method for SLS processes has been developed that is considered in this paper.

Keywords: selective laser melting, mathematical model, microscale modeling, mesoscale modeling, multilevel modeling, digital twin

Received: 08.04.2022 Accepted: 20.04.2022

INTRODUCTION

The layer-by-layer production technology of threedimensional physical objects has become widespread. The method that is the fusion of metal powder microparticles using the high-power laser radiation as a heat source, is called the selective laser melting technology (SLM) [1]. It allows to make almost finished products with extremely comprehensive geometry, including those with the internal channels and cavities. Figure 1 shows the examples of products made using the SLM-machine M250 [2].

One of the SLM technology problems is that the layers of satisfactory quality for each specific metal or alloy are generated only in a narrow range of laser processing modes. An experimental search for such modes is extremely labor-consuming, while the numerical simulation reduces the labor costs for their selection [3]. An analysis of publications

hv



Рис. 1. Примеры изделий, выращенные на СЛС-машине M250 [2]: слева – смеситель, справа – гироидные структуры **Fig. 1.** Examples of products grown using the SLM-machine M250 [2]: on the left – a mixer, on the right – gyroid structures

готовые изделия сверхсложной геометрии, в том числе с внутренними каналами, полостями. Рис. 1 иллюстрирует примеры изделий, выращенных на СЛС-машине М250 [2].

Одна из проблем СЛС-технологии состоит в том, что удовлетворительные по качеству слои для каждого конкретного металла или сплава формируются только в узком диапазоне режимов лазерной обработки. Экспериментальный поиск таких режимов крайне трудоемок, в то время как численное моделирование снижает трудозатраты на их подбор [3]. Анализ публикаций по численному моделированию позволяет сделать вывод о необходимости многоуровнего моделирования. Можно выделить три уровня численного моделирования процесса СЛС: микромасштабный, мезомасштабный и макромасштабный (рис. 2). Макроуровень предназначен для описания теплового и напряженно-деформируемого состояния в масштабе изделия, мезоуровень - для обобщенного описания СЛС-процессов в масштабе размера характерного элемента конструкции изделия, микроуровень - для детального описания гидродинамических и теплофизических процессов СЛС в масштабе ванны расплава. Разработка цифрового двойника, включающего в себя как автономное предварительное, так и оперативное моделирование процессов на различных уровнях, позволит существенно сократить длительность подготовки аддитивного производства и обеспечить высокое качество изделий.

devoted to the numerical modeling allows to conclude that the multiscale modeling method is necessary. There are three scales of numerical modeling for SLM process: microscale, mesoscale, and macroscale (Fig. 2). The macroscale is designed for describing the thermal and stress-strain behavior in the product scale, the mesoscale is designed for a generalized description of the SLM processes in the scale of the typical structural element of the product, the microscale is designed for a detailed description of the SLM hydrodynamic and thermophysical processes in the scale of the melt pool. The development of a digital twin that includes both autonomous preliminary and operational modeling of processes at various levels, shall significantly reduce the preparation time for additive manufacturing and ensure the high quality of the products.

MICROSCALE

It describes interaction of the laser radiation with metal powders near the melt pool. It is a combination of influences and phenomena of various nature:

- gravity force and buoyancy;
- surface tension force;
- Marangoni effect;
- reaction force of metal vapors;
- thermodynamics of phase changes;
- conductive heat transfer;
- convection heat transfer;
- radiation.

Descriptions of the mechanisms of these phenomena are used as the basis for the microscale



АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



МИКРОУРОВЕНЬ

Описывает взаимодействие лазерного излучения с металлическими порошками вблизи ванны расплава. Представляет собой сочетание воздействий и явлений разной природы:

- силы тяжести и плавучести;
- силы поверхностного натяжения;
- эффекта Марангони;
- силы реакции паров металла;
- термодинамики фазовых переходов;
- кондуктивной теплопередачи;
- конвективной теплопередачи;
- излучения.

Описания механизмов этих явлений лежат в основе математической модели микроуровня,

которая представляет собой систему уравнений механики сплошной среды с переменными свойствами и состоит из уравнения состояния, уравнения неразрывности, уравнения движения и уравнения энергии [4].

Микроуровневая математическая модель может быть реализована в рамках пакетов, предназначенных для моделирования гидродинамики, с дополнениями, описывающими переменные свойства среды. На рис. 3 mathematical model that is the coupledcontinuum mechanics equations with variable properties. It consists of the constitutive equation, the continuity equation, the motion equation, and the energy equation [4].

The microscale mathematical model can be implemented as a part of packages designed for the hydrodynamics modeling, with additions that describe the variable medium properties. Figure 3 shows the modeling results for a double laser radiation pass over a layer of metal powder. It can be seen that the melt pool is thickened at the beginning of each pass, the recess is formed at the end of the pass, and lack of fusion is obtained between the passes. By adjusting the laser processing mode



Fig. 3. Numerical modeling of the double laser radiation passes

ADDITIVE TECHNOLOGIES



приведены результаты моделирования двойного прохода лазерного излучения по слою металлического порошка. Видно, что в начале каждого прохода образуется утолщение ванны расплава, а в конце прохода – углубление, между проходами – недоплав. Корректируя параметры режима лазерной обработки, можно добиться полного проплавления частиц.

В настоящее время также уделяется внимание включению в математическую модель описания таких сложных гидродинамических явлений, как:

- кавитация,
- образование кумулятивных струй,
- отрыв фрагментов жидкой фазы,
- появление мелкодисперсных частиц металла.

Они могут оказывать влияние на баланс вещества и энергии в очаге плавления и на изменение направления лазерного пучка в области плавления.

Вычислительный эксперимент на основе микроуровневой модели (рис. 4), позволяет сформулировать гипотезу о механизме образования мелкодисперсных твердых частиц:

- В ванне расплава возникает конвекция, индуцированная силами Марангони: вблизи поверхности ванны жидкость вытекает из высокотемпературного очага (из зоны с малым поверхностным натяжением) на периферию.
- 2. Вытекающий из очага поток жидкости натекает на твердые границы и выплескивается, образуя кумулятивные струи за счет инерционных эффектов.
- Кумулятивные струи распадаются под действием капиллярной неустойчивости. Температурное поле кумулятивных струй имеет характерный вид: вершина остывает быстрее,

чем перемычка. Под действием сил Марангони материал перемещается из перемычки к вершине. Это ускоряет разрыв перемычки.

 Далее обособившийся фрагмент жидкости, постепенно охлаждаясь и затвердевая, движется по инерции, отдаляясь от основного материала и образуя твердую частицу. Численная реализация математической модели дополняparameters, it is possible to achieve complete particle penetration.

At present, special attention is also paid to inclusion of the description of the following comprehensive hydrodynamic phenomena in the mathematical model:

- cavitation;
- generation of cumulative jets;
- detachment of the liquid phase fragments;
- occurrence of finely dispersed metal particles

They can affect the matter and energy balance on the melting site and changes in the laser beam direction in the melting area.

A simulation experiment based on a microscale model (Fig. 4) allows to formulate a hypothesis relating to the formation mechanism of finely dispersed solid particles:

- 1. A convection induced by the Marangoni forces occurs in the melt pool: the liquid flows out from the high-temperature center (from the area with low surface tension) to the periphery near the pool surface.
- 2. The fluid flowing from the centerapproaches the solid boundaries and splashes out while generating the cumulative jets due to the inertial effects.
- 3. The cumulative jets disintegrate under the influence of capillary instability. The temperature field of cumulative jets has a typical form: the top area becomes cool faster than the bridge. The Marangoni forces lead to the material movement from the bridge to the top area. This accelerates the bridge disruption.
- 4. Further, the isolated liquid fragment that is gradually cooling and solidifying, is moved under its own inertia, moving away from the base material and forming a solid particle.



Fig. 4. Modeling of a fine-dispersed particle generation



АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ется моделью разбрызгивания, включающей вылет частиц исходного материала и расплавленного металла. Жидкая фаза заменяется сферической частицей эквивалентной массы, сохраняя скорость, направление движения, температуру и др. параметры. Для этого используется преобразование из «Volume of fluid» в «Discrete Particle Modeling» (VOF-to-DPM).

МЕЗОУРОВЕНЬ

Обобщенно описывается гидродинамика и теплофизика СЛС-процесса в масштабе, промежуточном между масштабами ванны плавления и изделия в целом. В основе мезо-уровневой модели лежат уравнение теплопроводности с включением тепловых источников и потерь и уравнение динамики пористости. Малые вычислительные затраты по сравнению с моделью микроуровня связаны с принятыми допущениями:

- среда рассматривается как сплошная с переменными свойствами физические параметры, входящие в уравнение теплопроводности, зависят от температуры и/или пористости. Используемый коэффициент теплопроводности включает теплопроводности включает теплопроводность сплошного материала, каркасную и лучистую теплопроводности пористого материала [5];
- перенос энергии за счет конвекции расплавленного металла учитывается с помощью выбора эффективной теплопроводности жидкой фазы.

Для описания взаимодействия лазерного излучения с металлическим порошком в рамках мезоуровневой модели необходимо определить эффективные параметры и установить их зависимости от температуры и/или пористости, т.е. модель необходимо откалибровать. Калибровка может осуществляться на основе как экспериментальных исследований, так и на основе микроуровневого моделирования.

Проведена калибровка теплопроводности жидкой фазы, поскольку в модели не проводится прямой расчет конвекции расплавленного металла. Параметры режима лазерной обработки и характеристики материала порошка в обеих моделях одинаковы. В качестве критерия корректности калибровки использовалась пиковая температура в центре ванны плавления (рис. 5).

Важную роль при выращивании изделий методом СЛС играет стратегия сканирования,

The numerical implementation of the mathematical model is supplemented by a spattering model that includes the particle escape of the base material and molten metal. The liquid phase is replaced by a spherical particle with equivalent mass, while keeping the speed, direction of movement, temperature, and other parameters. For this purpose, a conversion from "Volume of fluid" to "Discrete Particle Modeling" (VOF-to-DPM) is used.

MESOSCALE

This scale provides a general description of the SLM process hydrodynamics and thermal physics in a scale that is intermediate between the scales of the melt pool and the entire product. The mesoscale model is based on the heat conduction equation with inclusion of the heat sources and losses and the porosity dynamic equation. Low computational costs compared to the microscale model are related to the following assumptions made:

- the medium is considered as a continuous medium with variable properties, and the physical parameters included in the heat conduction equation depend on temperature and/or porosity. The thermal conductivity coefficient used includes the thermal conductivity of a solid material, the frame and radiant thermal conductivity of a porous material [5];
- the energy transfer due to the molten metal convection is considered by selecting the efficient the rmal conductivity of the liquid phase.

In order to describe the laser radiation interaction with a metal powder as a part of a mesoscale model, it is necessary to determine the effective parameters and establish their dependence on temperature and/or porosity, i.e., the model needs to be calibrated. Calibration can be performed on the basis of both experimental studies and microscale modeling.

The thermal conductivity of the liquid phase is calibrated, since the model does not directly provide calculation of the molten metal convection. The laser processing mode parameters and the powder material specifications are equal in both models. The peak temperature in the center of the melt pool is used as a calibration validity criterion (Fig. 5).

An important role in the product growth by the SLM method is played by the scanning strategy that affects the value of residual porosity and residual stresses. By using the mesoscale model, several options of scanning strategies for a product in the form of a rectangular trapezoid are studied (Fig. 6).

ADDITIVE TECHNOLOGIES

влияющая на величину остаточной пористости и остаточных напряжений. Используя модель мезоуровня, исследовано несколько вариантов стратегий сканирования изделия в виде прямоугольной трапеции (рис. 6).

Результаты моделирования показывают, что при такой постановке задачи наличие или отсутствие холостых ходов лазерного пятна не оказывает существенного влияния на конечное состояние изделия. Это было подтверждено экспериментально (рис. 6). В расчетах в ряде случаев наблюдается остаточная пористость (рис. 7).

Вычислительные затраты для моделирования рабочих процессов СЛС растут с увеличением размера изделия и переходе от двумерного моделирования к трехмерному.

Следовательно, увеличивается и время счета. Поэтому такие модели требуют параллельного и распределенного выполнения на компьютерных кластерах и/или использования возможностей многоядерных графических карт (GPU). Это приводит к более сложной задаче реализации на основе параллельных программных платформ. Поэтому перспективным является использование GPU для реализации модели мезоуровня.

В исследовании [6] рассматривается реализация численного решения уравнения теплопроводности итерационными методами на GPU двумя способами - итерационный (метод верхней релаксации) и метод, использующий в своей основе метод прогонки для трехдиагональной матрицы. Метод прогонки по своей сути является принципиально последовательным, однако, если его использовать применительно ко всей системе целиком. Если же систему расщепить по пространственным координатам (метод переменных направлений), то можно использовать прогонку для отдельного луча в направлении каждой координаты, и запустить число потоков, равное числу таких лучей. В итоге получается эффективный алгоритм, превосходящий по скорости простой итерационный метод, но работающий только для матриц специального вида.





```
Fig. 5. Temperature field: top – microscale, bottom – mesoscale after calibration
```

The simulation results show that in the case of such a problem formulation, the availability or absence of the laser spot idle motions does not significantly affect the final product condition. It was confirmed experimentally (Fig. 6). In some cases, residual porosity is observed in the calculations (Fig. 7).



Рис. 6. Выращенные на СЛС-машине М250 [2] изделия в форме трапеции

Fig. 6. Trapezium-shaped products grown using the SLMmachine M250 [2]



АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование является эффективным инструментом для определения режимов лазерной обработки в СЛС-процессе. Анализ публикаций позволяет сделать вывод о переходе к методологии многоуровневого моделирования, включающей микро-, мезо- и макро-уровни. Деление уровней проводится по пространственному масштабу: от ванны расплава до целого изделия. Все уровни взаимосвязаны: мезои макро-задачи должны решаться параллельно, а микро-задача решается предварительно и служит для калибровки мезоуровневой модели. Создание такого цифрового двойника позволяет описать все существенные процессы СЛС и становится важным элементом процесса подготовки производства для тестирования вариантов технологических режимов выращиваемых изделий.

the SLM workflow modeling are increased with the product size and transition from 2D to modeling. Consequently, 3D the computational time is also increased. Therefore, such models require parallel and distributed implementation using the computing clusters and/or capabilities of the multi-core graphics cards (GPUs). This leads to a more comprehensive implementation task based on the parallel software platforms. Therefore, it is rather promising to use the GPU for the mesoscale model implementation.

The computational costs for

The paper [6] considers implementation of the numerical solution for the heat conduction equation by iterative methods using the GPU in two ways, such as an iterative method (over-relaxation method) and a strategy based on the elimination method for a tridiagonal matrix. The elimination method is fundamentally consistent, however, if it is used in relation to the entire system. If the system is split into the spatial coordinates (alternating direction implicit method), then it is possible to use elimination

for a separate beam in the direction of each coordinate, and launch the number of flows equal to the number of such beams. The result is an efficient algorithm that outperforms the simple iterative method in speed, but is applicable only for the special-type matrices.

CONCLUSION

Numerical simulation is an efficient tool for determining the laser processing modes in the SLM process. The analysis of publications allows to conclude that there is a transition to a multiscale modeling methodology that includes the micro-, meso-, and macroscales. The scales are classified according to the spatial scale: from the melt pool to the entire product. All scales are interconnected: the mesoand macro-problems must be solved simultaneously, and the micro-problem is solved in advance and is used for the mesoscale model calibration. The

ADDITIVE TECHNOLOGIES

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев Г.А., Кривилев М. Д., Анкудинов В. Е. Компьютерное моделирование селективного лазерного плавления высокодисперсных металлических порошков. Вычислительная механика сплошных сред. 2017; 10(3):293–312. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.23.
- Истомина Н., Карякина Л. Наука и бизнес на рынке лазерных технологий. Фотоника. 2018; 12–6. (74): 542–548. DOI: 10.22184/1993–7296.2018.12.6.542.548.
- Богданович В. И., Гиорбелидзе М. Г., Сотов А. В., Проничев Н. Д., Смелов В. Г., Агаповичев А. В. Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017; 19(4): 2–3.
- Борейшо А. С., Джгамадзе Г.Т., Зыбина В. В., Моисеев А.А., Савин А.В., Смирнов П.Г., Смоленцев С.С., Тимофеев В.А., Третьяк П.С. Микроуровневое моделирование теплофизических и гидродинамических процессов селективного лазерного сплавления. Теплофизика высоких температур. 2022;60(1):1–7. DOI: 10.31857/S0040364422010148.
- 5. **Добрего К. В., Жданок С. А.** Физика фильтрационного горения газов. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ. 2002; 203 с. ISBN 985-6456-29-0.
- Смирнов П. Г., Третьяк П. С., Джгамадзе Г.Т. Параллельная реализация неявного метода и метода расщепления для численного решения уравнения теплопроводности на графическом ускорителе. Молодежь. Техника. Космос: труды XII Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Балт. гос. техн. ун-т. С-Пб. 2019; 1: 171–179. ISBN: 978-5-94652-672-2

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Борейшо А. С. – разработка концепции применения математического моделирования при реализации технологии СЛС. Савин А. В. – руководитель, разработка методологии многоуровнего моделирования. Смирнов П. Г. – программная реализация итерационных методов на графическом ускорителе. Моисеев А. А. – разработка и программная реализация модели микроуровня. Джгамадзе Г. Т. – разработка и программная реализация модели мезоуровня.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и согласовали текст в части своей работы.

ОБ АВТОРАХ

- Борейшо Анатолий Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Научный руководитель, Акционерное общество «Лазерные системы», https://www.lsystems.ru, пос. Стрельна, Санкт-Петербург, заведующий кафедрой И1, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «BOEHMEX» им. Д. Ф. Устинова», (БГТУ «BOEHMEX» им. Д. Ф. Устинова), Boreysho@lsystems.ru, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0002-3245-9321
- Савин Андрей Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Акционерное общество «Лазерные системы», https://www.lsystems.ru, пос. Стрельна, Санкт-Петербург, профессор кафедры ИІ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова), izooandrey@inbox.ru, Санкт-Петербург, Россия. WoS ResearcherlD: V-2255-2018
- Смирнов Петр Геннадьевич, инженер 1-й категории, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова), petr.s.8314@mail.ru, Санкт-Петербург, Россия. WoS ResearcherID: V-8450-2018
- Моисеев Андрей Андреевич, инженер 1-й категории, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова), terminalmashine@gmail.com, Санкт-Петербург, Россия.
- Джгамадзе Гванца Тенгизовна, инженер 2-й категории, DgvancaT96@mail.ru, Акционерное общество «Лазерные системы», https://www.lsystems.ru, пос. Стрельна, Санкт-Петербург

creation of such a digital twin makes it possible to describe all essential SLM processes and becomes an important element of the production preparation process for testing the process modes of grown products.

REFERENCES

- Gordeev G. A., Krivilev M. D., Ankudinov V. E. Computer simulation of selective laser melting of fine-grained metallic powders. *Computational Continuum Mechan*ics. 2017; 10 (3): 293–312. DOI: 10.7242/1999–6691/2017.10.3.23.
- Istomina N., Karyakina L. Science and business in the market of laser technologies. *Photonics Russia*. 2018; 12–6 (74):542–548. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.6.542.548.
- Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G., Sotov A. V., Pronichev N. D., Smelov V. G., Agapovichev A. V. Mathematical modeling of powder melting process in selective laser melting technology. News of the Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences. 2017; 19(4): 2–3.
- Boreysho A. S., Dzhgamadze G. T., Zybina V. V. Moiseev A. A., Savin A. V., Smirnov P. G., Smolentsev S. S., Timofeev V. A., Tretyak P. S. Microscale modeling of thermophysical and hydrodynamic processes of selective laser melting. Thermophysics of high temperatures. 2022; 60(1):1–7. DOI: 10.31857/S0040364422010148.
- Dobrego K. V., ZHdanok S. A. Physics of filtration combustion of gases. Minsk: Institute of Heat and Mass Transfer. A. V. Lykov NASB. 2002; 203 p. ISBN 985-6456-29-0.
- Smirnov P. G., Tretyak P. S., Dzhgamadze G. T. Parallel implementation of the implicit method and the splitting method for the numerical solution of the heat equation on a graphics accelerator. Young people. Technic. Cosmos: Proceedings of the XII All-Russian Youth Scientific and Technical Conference Baltic State Technical University. Saint-Petersburg. 2019; 1: 171–179. ISBN: 978-5-94652-672-2.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

Boreysho A. S. – concept of simulation in the frame of whole SLM technology realization. Savin A. V. – supervisor, development of the methodology of multilevel modeling. Smirnov P. G. – software implementation of iterative methods on a graphics accelerator. Moiseev A. A. – development and software implementation of the micro-level model. Dzhgamadze G. T. – development and software implementation of the meso-level model.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

ABOUT THE AUTHORS

- Boreysho Anatoliy Sergeevich, D. Sc. of Engineering Sciences, professor, Scientific supervisor, Timeline of Laser Systems JSC, https://www.lsystems.ru, Strelna, St. Petersburg; Head of the II department, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Boreysho@lsystems.ru, St. Petersburg, Russia.
- Savin Andrey Valerevich, D. Sc. of Engineering Sciences, professor, Chief Researcher, Timeline of Laser Systems JSC, https://www.lsystems.ru, Strelna, St. Petersburg; lecturer of the II Department, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, izooandrey@inbox.ru, St. Petersburg, Russia. WoS ResearcherID: V-2255-2018

Smirnov Petr Gennadevich, Engineer of the 1st category, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, petr.s.8314@mail.ru, St. Petersburg, Russia. WoS Researcher1D: V-8450-2018

- Moiseev Andrey Andreevich, Engineer of the 1st category, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, terminalmashine@gmail.com, St. Petersburg, Russia.
- Dzhgamadze Gvantsa Tengizovna, Engineer of the 2nd category, DgvancaT96@mail.ru, Timeline of Laser Systems JSC, https://www.lsystems.ru, Strelna, St. Petersburg, Russia.