

РЕШЕНИЕ САМОСОГЛАСОВАННОЙ ЗАДАЧИ ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛОТНЫЙ ГАЗ С ЦЕЛЬЮ ПРОВЕДЕНИЯ ВНЕВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Бармин¹, Р.Н. Ризаханов¹, Р.И. Рудштейн^{1,2}

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»;

² Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: nanocentre@kerc.msk.ru

Процесс электронно-лучевой вневакуумной термообработки материалов является сложным многомасштабным явлением (рис.1). При этом характеристики эквивалентного источника тепла, инициирующего фазовые превращения в материале, непосредственно связаны с характеристиками и параметрами воздействующего на образец электронного пучка.

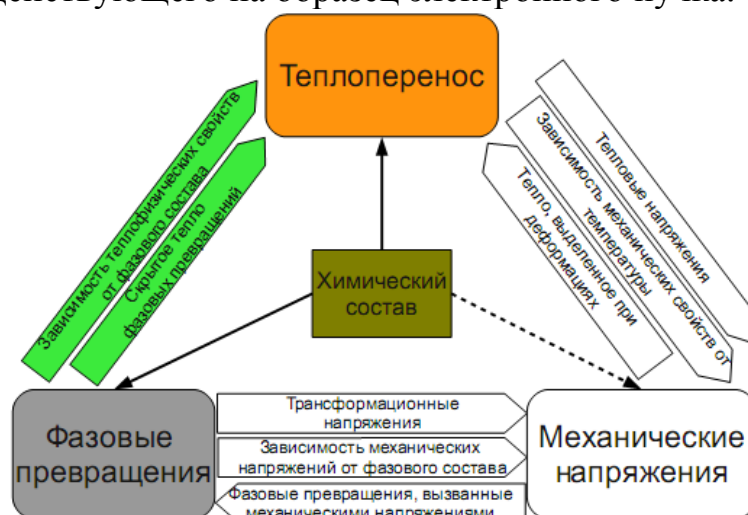


Рис. 1. Взаимосвязь физических процессов при термообработке материалов. Белым обозначены явления и процессы, еще не включенные в предложенную модель.

В рамках настоящей работы разработана многоэтапная модель [1], позволяющая проследить изменения характеристик высокоэнергетических частиц на протяжении всего тракта транспортировки от катода через шлюзовую систему и газовый промежуток к образцу.

Самосогласованная задача распространения потока быстрых электронов в плотной газовой среде в наиболее общем виде решалась в работе [2]. Однако в указанной модели существует ряд принципиальных ограничений, которые могут быть сняты. Основные из них: 1) используется нестационарная система уравнений Эйлера для идеального газа; 2) не учитывается теплообмен между газом и граничащими с ним твердыми телами; 3) отсутствует рассмотрение естественной конвекции; 4) не учитывается вклад вторичных электронов в энергетическое распределение; 5) применяется осесимметричная геометрия расчетной области; 6) не учитывается отражение электронов от твердых стенок; 7) отсутствует версия алгоритма для проведения расчетов в стационарной постановке, позволяющая проводить поиск установившегося состояния системы.

Использование данной модели позволяет решить проблему реализации определенного многопараметрического режима обработки на установке по вневакуумному упрочнению с помощью электронного пучка без привлечения широко используемых допущений и феноменологических зависимостей [3], снижающих общность и универсальность подхода как целого.

Разработанная модель включает в себя следующие основные стадии технологического процесса обработки поверхности образца.

На первой стадии рассматривается прохождение электронного потока в газовой атмосфере от самой электронной пушки через транспортный тракт шлюзовой системы вплоть до поверхности образца. Параметры пучка у поверхности являются функциями от характеристик инжектируемого пучка, давления газа, его химического состава, наличия сопровождающего магнитного поля, степени нагрева газа. Поэтому учтены рассеивающие и диссипирующие эффекты, возникающие в среде и приводящие к нагреву газа. Результатом решения задачи на данной стадии является энергетический спектр электронов, радиальное и угловое распределение плотности тока.

Вторая стадия описывает взаимодействие электронов с образцом и преобразование энергии электронов в тепло. Часть энергии падающего пучка уносится отраженными электронами, часть — в виде излучения, а часть преобразуется в тепло. На данном этапе рассчитывается распределение тепла в приповерхностном слое тела — определяется функция источников.

Третья и четвертая стадии рассматриваются совместно. Они в совокупности описывают явление автозакалки при интенсивном теплоотводе вглубь образца, вследствие чего поверхностный слой приобретает структуру с повышенной твердостью. Решается тепловая задача — находится эволюция температурного поля в приповерхностном слое образца с учетом морфологии поверхности, и одновременно моделируется кинетика структурно-фазовых превращений в железоуглеродистых сталях [4].

Для расчетов первой и второй стадий выбран набор библиотек Geant4 [5].

Характеристики объемного источника тепла в образце, эквивалентного воздействию концентрированного потока энергии, находятся на второй стадии расчета аналогичным первой стадии методом — параметры газовой среды заменяются соответствующими величинами для материала образца.

Расчеты проводились по последовательной итеративной схеме, предложенной в работе [2]. Первой решается задача о распространении потока высокоэнергетичных электронов в среде с известным распределением плотности [6]; далее решается теплофизическая газодинамическая задача при известных характеристиках эквивалентного теплового источника; и, наконец, цикл повторяется с новыми значениями плотности. В пользу такого подхода свидетельствует существенная разница характерных времен процесса энерговыделения и теплопередачи в потоке газа.

Важно отметить, что для многоэтапной модели действует лишь одно ограничение - на мощность электронного пучка, связанное с пренебрежением эффектами, возникающими вследствие сильной ионизации среды

распространения электронов и превращения газа в плазму с соответствующим изменением уравнения состояния среды.

При проведении теплофизических и гидродинамических расчетов газовой среды были использованы следующие уравнения:

Уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \text{ где}$$

\mathbf{U} – скорость потока и ρ – плотность, которая определяется из уравнения состояния.

Уравнение сохранения момента движения

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \mathbf{U} \nabla \cdot \rho \mathbf{U} - \nabla \cdot \left[\mu_{eff} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right] = -\nabla p,$$

где $p = p_s + \rho \cdot gh + p_{ref}$, p_s – статическое давление, p_{ref} – базовый уровень давления, $\rho \cdot gh$ – возникает вследствие действия гравитации; \mathbf{I} – единичный тензор; $\mu_{eff} = \mu_{lam} + \mu_{turb}$ – эффективная вязкость. Кинетическая вязкость μ_{lam} задается с использованием табличных данных.

Уравнение сохранения энтальпии h

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) - h \nabla \cdot \rho \mathbf{U} - \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla h) = \nabla \cdot (\mathbf{U} p) - p \nabla \cdot \mathbf{U} - 4\pi \epsilon_N + Q_e,$$

где $\alpha_{eff} = \alpha_{lam} + \alpha_{turb}$ – коэффициент эффективной теплопроводности; $4\pi \epsilon_N$ – потери тепла, связанные с излучением; Q_e – эквивалентный источник тепла КПЭ, α_{lam} задается с использованием табличных данных.

При решении вышеприведенных уравнений методом конечных объемов для обхода нелинейной связи скорости и давления применяются

1. алгоритм SIMPLE для стационарной постановки задачи;
2. алгоритм PIMPLE для рассмотрения процесса в динамике.

Для твердых тел имеем следующее уравнение теплопереноса

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (K \Delta T) + Q_e, \text{ где}$$

Теплофизические параметры плотности ρ , удельной теплоемкости C_p и коэффициента теплопроводности K задаются с использованием табличных данных.

Расчетный модуль многоэтапной модели реализован на основе модуля chtMultiRegionFoam из пакета библиотек OpenFOAM [7], который содержит полный набор уравнений для решения двухфазной задачи теплообмена (включая теплопередачу излучением) в геометрически сложной пространственной области при наличии естественной конвекции. В соответствующие уравнения добавлены члены, связанные с наличием эквивалентного теплового источника. Это позволило снять большинство ограничений программной реализации алгоритма, предложенного в [2].

Удобство многоэтапной модели состоит в том, что можно ограничить вычисления определенной стадией. Это позволяет расширить круг рассматриваемых задач и получить следующие результаты:

- 1) расчет параметров потока электронов на протяжении тракта транспортировки при нарушении осевой симметрии системы;
- 2) нахождение пространственного поля температур газа, в который выведен пучок электронов;
- 3) нахождение пространственного распределения энерговыделения в приповерхностном слое вещества.

Визуализация результатов расчетов для различных стадий модели и сильно отличающейся морфологии поверхностей приведена на рис. 2 - 4. На рис. 5 приведено сравнение пространственных распределений температуры среды, полученных для сходных условий вывода пучка и течения газа в нестационарной и стационарной постановках.

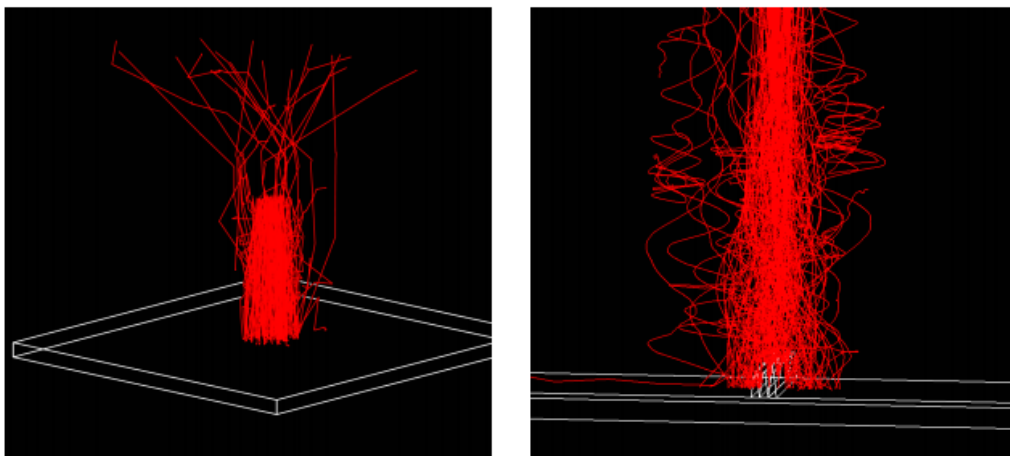


Рис. 2. Визуализация расчетов на первой стадии модели для плоскопараллельной пластины (слева) и поверхности с выступами (справа).

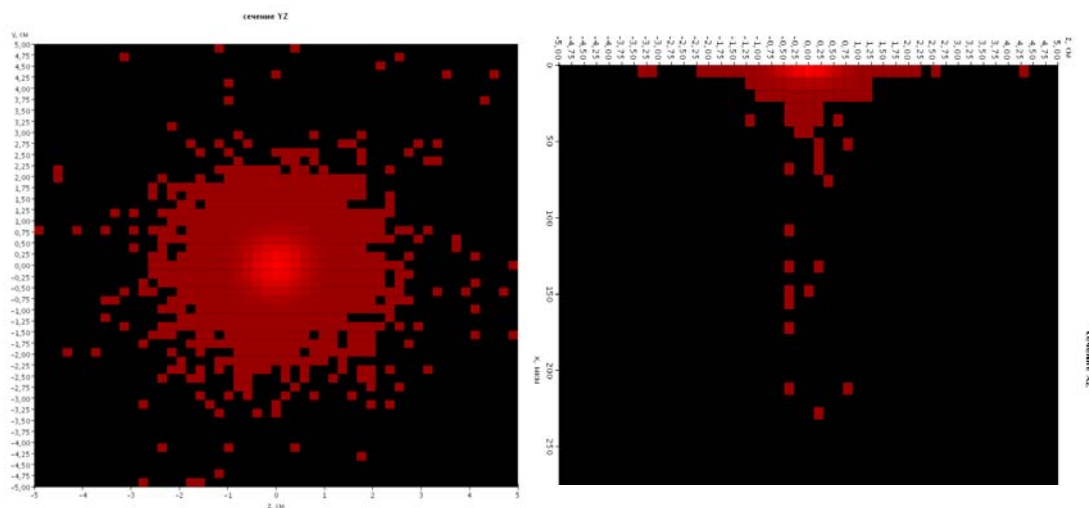


Рис. 3. Визуализация расчетов на второй стадии модели для плоскопараллельной пластины: распределение вдоль поверхности (слева) и распределение по глубине (справа).

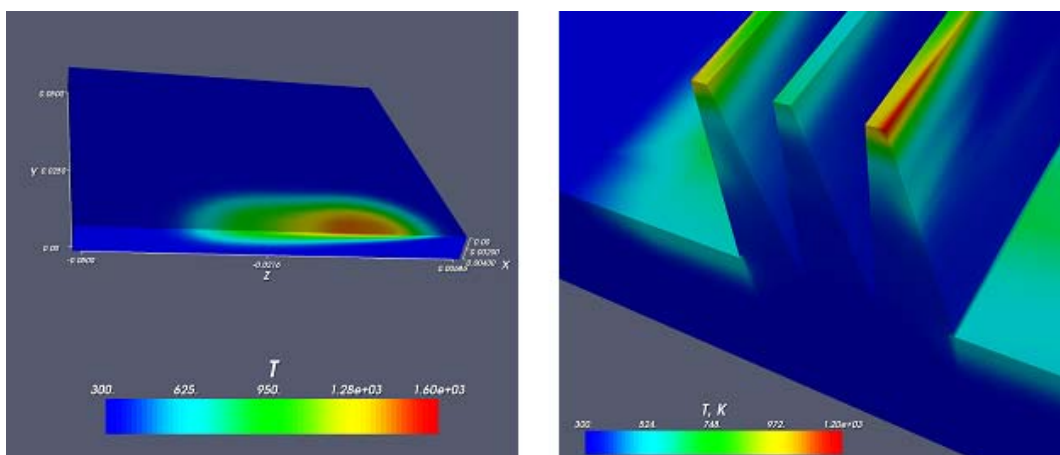


Рис. 4. Визуализация расчетов температурных полей на последнем этапе модели

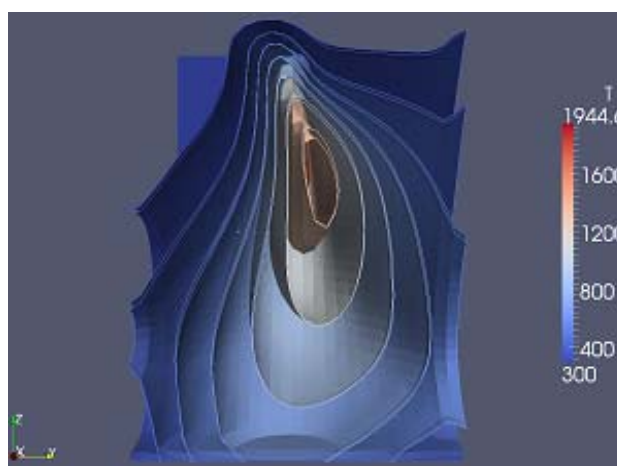


Рис.5. Сравнение пространственных полей температуры газа, полученных в динамической и в стационарной постановках. Вывод пучка электронов происходит в газ с боковым течением.

1. H.Xian-Wei, R.N.Rizakhanov, A.A.Barmin et al. Numerical Model of Materials Surface Hardening Using High Energy Electron Beam in Atmosphere //Journal of Rocket Propulsion. 2011. Vol. 39, no. 2.
2. А.С.Ловцов Модель распространения концентрированного потока электронов в воздухе атмосферного давления // Электронный журнал «Исследовано в России». 2004. С. 1779-1787. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/165.pdf>
3. Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев, А.Н. Кокора Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
4. В.Г.Щукин, В.В.Марусин Моделирование энергопоглощения в стали при обработке мощными высокочастотными импульсами различной частоты // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45, № 6 С. 154–168.
5. J.Allison, K.Amako, J.Apostolakis et al. Geant4 Developments and Applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53, no. 1. P. 270–278.
6. D.Yong-Feng, H.Xian-Wei, T Chang. Monte Carlo simulation of electron beam air plasma characteristics // Chinese Physics B. 2009. Vol. 18, no. 9. P. 3870–3876.
7. H.G.Weller, G.Tabor, H.Jasak et al. A Tensorial Approach to CFD using Object Orientated Techniques // Computers in Physics. 1998. Vol. 12, no. 6. P. 620–631.