
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 004.94

**МОДЕЛЬ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА ФОРМИРОВАНИЯ
ВИРТУАЛЬНОГО СВАРНОГО ШВА**

© 2019 В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.А. Толстов, В.Т. Саункин

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В статье рассматривается разработка модифицированного метода конечных элементов для расчётов параметров виртуального процесса сварки и геометрических характеристик виртуального сварного соединения в режиме реального времени. Показано представление сварного соединения в виде массива вертикальных конечных элементов квадратного сечения с подвижной горизонтальной границей твёрдой и расплавленной частей. В результате разработки получены возможности для визуализации сварного соединения и расчёта его параметров.

Ключевые слова: математическое моделирование, сварочный процесс, тепловая модель, метод конечных элементов, модификация метода конечных элементов, тренажёр ручной дуговой сварки, визуализация сварного шва, оценка параметров шва, обработка в реальном времени, расчёт тепловых потоков.

Поступила в редакцию: 14.10.2019

После доработки 29.10.2019

Принята к публикации 13.11.2019

В настоящее время обучение навыкам ведения процесса ручной дуговой сварки (РДС) осуществляется выполнением контрольных сварных соединений (КСС). Качество КСС проверяется после завершения процесса с помощью различных разрушающих и не разрушающих методов контроля.

Основными проблемами обучения сварщика РДС на реальном процессе являются: трудоемкость, высокая цена оборудования для некоторых методов контроля и невозможность контроля процесса в реальном времени.

Одним из решений проблемы является применение, по крайней мере, для некоторых этапов обучения сварщиков тренажёрных систем, которые позволяют выработать первоначальные навыки при оперативной оценке качества ведения сварки. Современные информационные технологии и средства виртуальной реальности позволяют создавать тренажёры с широкими возможностями. Одной из таких систем является мультимедийный тренажёр для обучения РДС, разрабатываемый на кафедре «Информационные и управляющие системы» Волгодонского инженерно-технического института НИЯУ МИФИ [1, 2].

Существенным преимуществом такого способа обучения является возможность неоднократно воспроизвести виртуальный процесс сварки и подвергнуть всестороннему анализу данные о процессе (характеристики движений торца электрода относительно разделки, ток и напряжение сварки, параметры проплавления в любом сечении виртуального шва и др.) [3, 4]. Форма выбора параметров упражнения показана на рисунке 1.

Имитация сварочного процесса основана на числовой модели распределения тепла, плавления металла и формирования сварного шва. Входными данными модели

являются перемещения имитатора держателя электрода, регистрируемые устройством координатного слежения (УКС) NaturalPoint TrackIR.

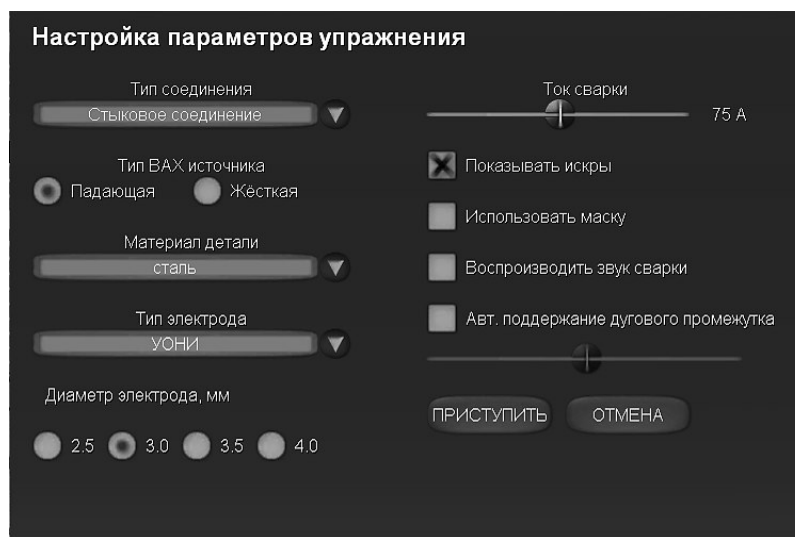


Рисунок 1 – Настройка параметров упражнения [Exercise setting up]

С помощью УКС осуществляется регистрация координат держателя электрода, по которым рассчитываются координаты конца электрода и углы его наклона. Координаты подаются в ЭВМ, и по ним рассчитывается длина дуги, по которой определяются ток сварки и напряжение на дуге [5, 6]. Выполнение упражнения начинается после нажатия кнопки «Приступить». Точка просмотра устанавливается над центром детали, направление – ортогонально детали. На рисунке 2 показано, как формируется виртуальный сварной шов.

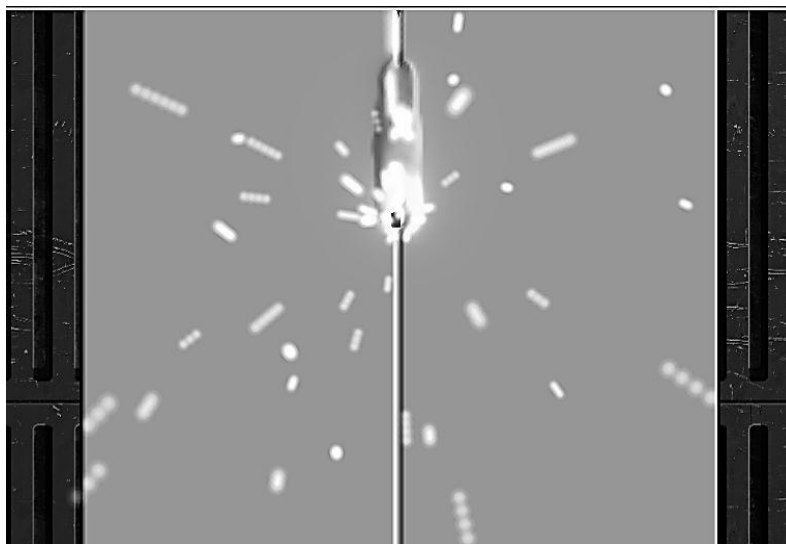


Рисунок 2 – Формирование виртуального шва [Virtual joint modeling]

Особенностью тренажера является возможность просмотреть повторно весь сеанс сварки, причем можно изменять точку зрения (положение камеры), замедлять, ускорять и останавливать воспроизведение. Есть также возможность видеть разрез сварочной ванны, в том числе – движущийся вместе с камерой. На разрезе расплав и твердый металл представлены прозрачными, непрозрачны только границы расплава – верхняя и нижняя, как показано на рисунке 3. Это позволяет наблюдать за формированием, как поверхности шва, так и его корня.

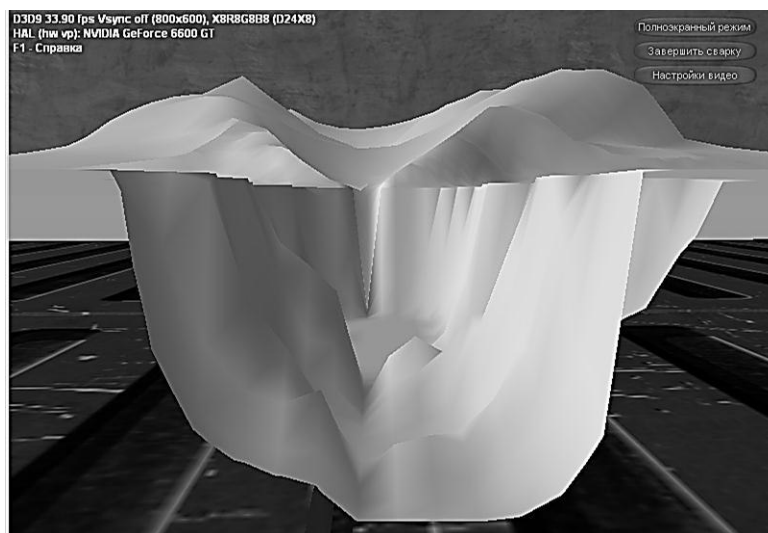


Рисунок 3 – Поверхности виртуального шва [Surfaces of virtual joint]

Для решения тепловой задачи в реальном времени используется метод конечных элементов (МКЭ) [7]. Рассмотрим подробнее особенности используемой в тренажере модели. В текущей версии рассматривается горизонтальное расположение плоской заготовки (плиты). Конечные элементы (КЭ) в модели – это вертикальные стержни, на которые плита разбита квадратной сеткой, определенной на ее поверхности.

В отличие от стандартного МКЭ в конечных элементах учитываются три слоя с различной температурой: верхняя и нижняя поверхности, и поверхность плавления/кристаллизации (рис. 4) [8, 9, 10].

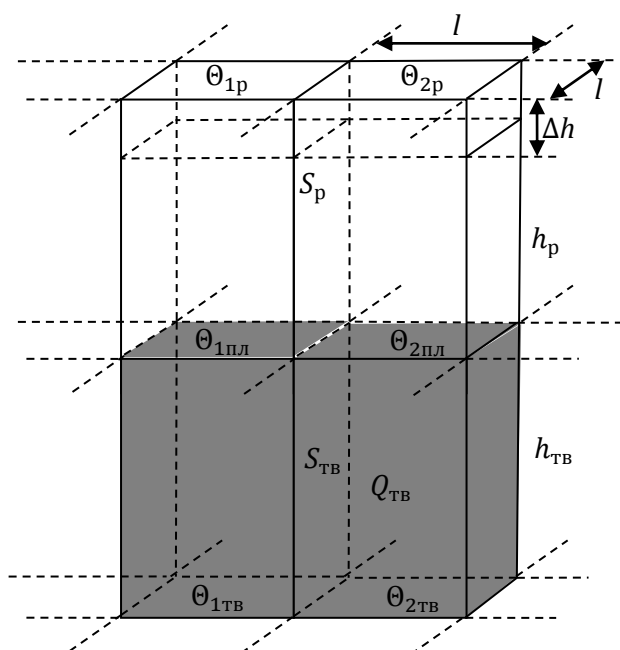


Рисунок 4 – Горизонтальная передача тепла между конечными элементами [Horizontal thermal transmission between finite elements]

Между слоями распределение температуры аппроксимируется линейно. Отсюда количество тепла (Дж), например, в расплавленной и твердой частях стержня равно:

$$Q_p = c\rho_p l^2 h_p (\Theta_p + \Theta_{пл})/2, \quad (1)$$

$$Q_{тв} = c\rho_{тв} l^2 h_{тв} (\Theta_{тв} + \Theta_{пл})/2, \quad (2)$$

где Q_p и Q_{mv} – количество тепла в расплаве и твердой части стержня (Дж);
 $c\rho_p$ и $c\rho_{mv}$ – объёмная теплоёмкость расплава и твердой части стержня (Дж/(м³·°K));
 l – размер клетки сетки (м);
 h_p и h_{mv} – высоты расплава и твердой части стержня соответственно (м);
 Θ_p , Θ_{mv} и Θ_{nl} – температуры верхнего, нижнего и среднего слоев соответственно (°K).

В частном случае полного расплавления/кристаллизации нижние/верхние два слоя сливаются.

Передача тепла между элементами моделируется в два этапа: горизонтальная передача (между элементами соответствующих слоев соседних стержней) и вертикальная (внутри стержней) [11, 12]. Рассмотрим горизонтальную передачу тепла:

$$\Delta Q = \Delta t \lambda_p S \frac{\Delta \Theta}{l}, \quad (3)$$

где ΔQ – количество переданного тепла (Дж);
 Δt – прошедшее время (сек);
 λ_p – теплопроводность расплава (Вт/(м·°K));
 S – площадь сечения, через которое передается тепло (м²);
 $\Delta \Theta$ – разница температур между соседними КЭ (°K).

В тонком слое толщиной Δh количество переданного тепла от стержня 1 к стержню 2 равно:

$$\Delta Q_{12p} = \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{(\Theta_{1p} - \Theta_{2p})}{l}, \quad (4)$$

где ΔQ_{12} – тепло переданное от стержня 1 к стержню 2 (Дж);
 Δh – толщина рассматриваемого слоя (м);
 Θ_{1p} – температура верхней поверхности расплава в стержне 1 (°C);
 Θ_{2p} – температура верхней поверхности расплава в стержне 2 (°C).

Тепло, полученное стержнем 2 от всех четырех, окружающих его:

$$\Delta Q_{2p} = \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{(\sum \Theta_p - 4\Theta_{2p})}{l}, \quad (5)$$

где $\sum \Theta_p$ – сумма температур в соответственном слое четырех соседних стержней (°C).

Соответствующее изменение температуры (°C) в верхнем слое стержня 2:

$$\Delta \Theta_{2p} = \frac{l}{c\rho_p l^2 \Delta h} \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{(\sum \Theta_p - \Theta_{2p})}{l} = \Delta t \lambda_p \frac{(\sum \Theta_p - \Theta_{2p})}{l^2 c\rho_p}. \quad (6)$$

По уравнениям (3-6) определяется изменение температуры и в других двух слоях, а поскольку температуры между слоями линейно аппроксимированы, то и во всех точках между ними. Уравнение (6) линейно, поэтому линейное изменение температуры между слоями сохраняется. Следует учитывать, что температура среднего слоя в случае полного расплавления/кристаллизации, т.е. при слиянии слоёв, отличается от температуры плавления.

Рассмотрим вертикальную передачу тепла (рис. 5).

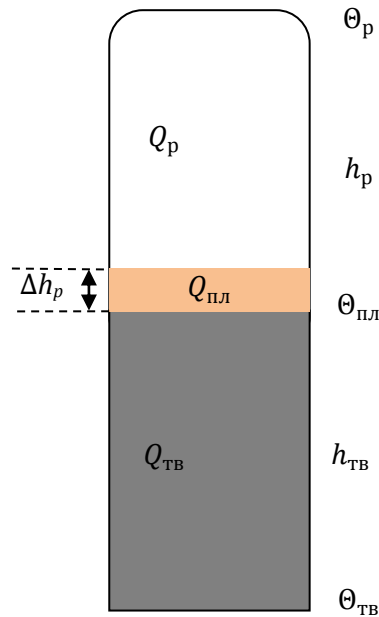


Рисунок 5 – Вертикальная передача тепла [Vertical thermal transmission]

В этой ситуации надо учесть плавление/кристаллизацию металла, т.е. движение границы расплава. Запишем условия баланса тепла на границе кристаллизации:

$$\Delta Q_p + \Delta Q_{пл} + \Delta Q_{тв} = 0. \quad (7)$$

Градиенты на границе определим из линейной аппроксимации распределения температур между слоями:

$$\Delta Q_p = \Delta t \lambda_p S (\Theta_p - \Theta_{пл}) / h_p, \quad (8)$$

$$\Delta Q_{тв} = \Delta t \lambda_{тв} S (\Theta_{тв} - \Theta_{пл}) / h_{тв}, \quad (9)$$

$$\Delta Q_{пл} = -\mu_{пл} S \Delta h_p, \quad (10)$$

где $\mu_{пл}$ – удельная теплота плавления (дж/м³).

Решая систему, получаем:

$$\Delta t \lambda_p S (\Theta_p - \Theta_{пл}) / h_p - \mu_{пл} S \Delta h_p + \Delta t \lambda_{тв} S (\Theta_{тв} - \Theta_{пл}) / h_{тв} = 0,$$

$$\Delta h_p = -\Delta t \frac{\lambda_p (\Theta_p - \Theta_{пл}) / h_p + \lambda_{тв} (\Theta_{тв} - \Theta_{пл}) / h_{тв}}{\mu_{пл}}.$$

Зная $\Delta Q_p, \Delta Q_{пл}, \Delta Q_{тв}$ и Δh_p , подставляем новые значения $Q_p, Q_{тв}, h_{пл}$ и h_p в (1-2) и находим новые $\Theta_p, \Theta_{тв}$. В случае полного расплавления/кристаллизации решение аналогично, но в качестве среднего слоя выбирается геометрический центр стержня. В настоящей статье не рассмотрены реализованные в текущей версии тренажера аспекты стержневой трехслойной модели, связанные с гидродинамикой сварочной ванны.

Предложенная упрощенная модель позволяет рассчитывать распределение тепла в заготовке в реальном времени и обеспечивает реалистичное изображение формирующегося шва. В режиме последующего анализа показывается подвижный

разрез шва с имитацией прозрачного расплава, что позволяет как преподавателю, так и ученику наблюдать появление дефектов соединения или их отсутствие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мультимедийный тренажер для ручной дуговой сварки / В. В. Кривин [др.] // Сварочное производство. – 2010. – № 5. – С. 57-59.
2. Компьютерный тренажер для обучения навыкам сварки при изготовлении и монтаже конструкций энергетического машиностроения. Отчет НИОКР (промежуточный) : 50.41.25 / НИЯУ МИФИ; руководитель А. А. Тямалов; исполнители В. В. Кривин [и др.] – Волгоград, 2014. – 176 с. – № ГР 114102740077. – инв. № 08.03-08.01-01.
3. Моделирование сигналов параметров виртуального сварочного процесса / В. В. Кривин [др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2014. – Т. 3, № 1. – С. 53-57.
4. Сысоев, Ю. С. Моделирование плавления электрода при разработке компьютерных 3D-тренажеров для обучения ручной дуговой сварке / Ю. С. Сысоев, В. В. Кривин, В. А. Толстов // Сварочное производство. – 2017. – № 10 – С. 12-17.
5. Использование устройства координатного слежения Trackir для измерения координат электрода в мультимедийном тренажере сварщика РДС / В. В. Кривин [др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 3(12). – С. 73-77.
6. Метрологический анализ устройства координатного слежения по его математической модели / В. В. Кривин [др.] // Наука XXI века : сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12 апреля 2016 г. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 68-70.
7. Уточненная математическая модель сварного шва для мультимедийного тренажера сварщика / М. Ю. Виниченко [и др.] // Сварочное производство. – 2015. – № 11. – С. 17-20.
8. Виниченко, М. Ю. Проверка адекватности тепловой модели стержневых конечных элементов для расчета виртуального шва / М. Ю. Виниченко, В. А. Толстов, В. В. Кривин // Динамика научных исследований: Материалы VII Международной научно-практической конференции. Перемышль, 5-17 июля 2011 г. – Польша, Перемышль : Наука и исследования, 2011. – С. 31-34.
9. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / С. А. Куркин [и др.] – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 454 с.
10. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар ; перевод с английского. – Москва : Энергоатомиздат, 1984 – 152 с.
11. Трофимова, Т. И. Курс физики. 11-е изд. / Т. И. Трофимова. – Москва : Академия, 2006. – 560 с.
12. Кривин, В. В. Расчёт параметров виртуального сварного шва в тренажере сварщика / В. В. Кривин, М. Ю. Виниченко, В. А. Толстов // Безопасность АЭС и подготовка кадров : тезисы докладов XII Международной конференции (Обнинск, 4-7 окт. 2011 г.). – Обнинск, 2011. – С. 110-112.

REFERENCES

- [1] Krivin V.V., Sas A.V., I.O. Ishigov et al. Mul'timedijny`j trenazher dlya ruchnoj dugovoj svarki [Multimedia Simulator for Manual Arc Welding]. Moscow. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2010. №5. P. 57-59 (in Russian).
- [2] Tyamalov A.A. et al. Komp'yuterny`j trenazher dlya obucheniya navy`kam svarki pri izgotovlenii i montazhe konstrukcij e`nergeticheskogo mashinostroeniya. Otchet o NIOKP (promezhutoch.) [Computer Training System for Manual Arc Welding Skills Used in Energetic Machine Production And Mounting. The Interim Report about Scientific Investigation and Empirical Construction]. Grant number: 114102740077. MPhI. Volgograd. 2014. 176 p. (in Russian).
- [3] Krivin V.V., Vinichenko S.M., Tolstov V.A. et al. Modelirovanie signalov parametrov virtual'nogo svarochnogo processa [Modeling of Parametric Signals of Virtual Welding Process]. Moscow. Vestnik natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI». 2014. V.3. №1. P. 53-57 (in Russian).
- [4] Sysoev Yu.S., Krivin V.V., Tolstov V.A. Modelirovanie plavleniya e`lektroda pri razrabotke komp'yuterny`x 3D-trenazherov dlya obucheniya ruchnoj dugovoj svarke [The Modeling of Node Molding during Development of 3D Computerized Simulators for Manual Arc Welding Training]. Moscow. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2017. №10. P. 12-17 (in Russian).
- [5] Krivin V.V., Ishigov I.O., Tolstov V.A. Ispol'zovanie ustrojstva koordinatnogo slezheniya Trackir dlya izmereniya koordinat e`lektroda v mul'timedijnom trenazhyore svarshhika RDS [The TRACKIR Coordinate Tracking Device Usage For Measurement Of Electrode Coordinates In The

- Multimedia Training System For Manual Arc Welding]. [Global Nuclear Safety]. 2014. №3. p.73-77 (in Russian).
- [6] Krivin V.V., Ishigov I.O., Tolstov V.A. et al. Metrologicheskij analiz ustrojstva koordinatnogo slezheniya po ego matematicheskoj modeli [The Metrological Analysis of Coordinate Tracking Device throw it's Mathematical Model] [Works of the Science-Practical Conference «Science of XXI Centuty»]. St. Petersburg. 2016. P. 68-70 (in Russian).
 - [7] Vinichenko M.Yu., Ishigov I.O., Krivin V.V. et al. Utochnennaya matematicheskaya model' svarnogo shva dlya mul'timedijnogo trenazhera svarshhika [The Refined Welding Joint Model for Multimedia Training System]. Moscow. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2015. №11. P. 17-20 (in Russian).
 - [8] Vinichenko M.Yu., Ishigov I.O., Krivin V.V. Proverka adekvatnosti teplovoj modeli sterzhnev'x konechny'x e'lementov dlya rascheta virtual'nogo shva [The Adequacy Check of Finite Element Model for Welding Joint Calculation] [Works of the VII International Science-Practical Conference «Dynamics of Scientific Investigations»]. Poland. Przemysl. Nauka i Studia [Science and Investigations]. 2011. P. 31-34 (in Russian).
 - [9] Kurkin S.A., Hovov M.V., Aksyonov Yu.N. et al. Komp'yuternoe proektirovanie i podgotovka proizvodstva svarny'x konstrukcij [Computer Development and Preparation for the Production of Welded Constructions]. Moscow : Izdatel'stvo MGTU im N.E'. Bauman [Bauman Moscow State Technical University Publishing]. 2002. 454 p. (in Russian).
 - [10] Patankar S. Chislenny'e metody` resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical Method of Solving Heat Transfers and Fluid Dynamics]. Moscow. E'nergoatomizdat [Atom Energy Publishing], 1984, 152 p. (in Russian).
 - [11] Trofimova, T.I. Kurs fiziki. 11-e izd. [Physics Course. 11-th edition]. Moscow. Akademiya [Academy]. 2006. 560 p. (in Russian).
 - [12] Krivin V.V., Vinichenko M.Yu., Tolstov V.A. Raschyot parametrov virtual'nogo svarnogo shva v trenazhyore svarshhika [The Calculation of Virtual Welding Joint in Multimedia Training System] [Works of the XII International Conference «Nuclear Power Plant Safety and Personnel Training»]. Obninsk. 2011. P. 110-112 (in Russian).

The Model for Thermal Calculation of Virtual Welding Joint Formation

V.V. Krivin¹, V.Y. Shpitser², V.A. Tolstov³, V.T. Saunkin⁴

*Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI»,
Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

¹ORCID: 0000-0003-0903-0786

WoS ResearcherID: E-2267-2018

e-mail: vvkrivin@mephi.ru

²ORCID: 0000-0002-5051-5091

e-mail: shpitser@mephi.ru

³ORCID: 0000-0001-7144-5195

WoS ResearcherID: F-1032-2017

e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru

⁴ORCID: 0000-0002-3462-4853

WoS ResearcherID: F-3352-2017

e-mail: saunkin@mail.ru

Abstract – The article deals with development of modified finite element method for real-time calculations of virtual welding parameters and virtual welding joint geometric properties. The representation of welding joint as array of square-based columns, with movable horizontal separator between solid and molded parts, is shown. The development causes the result as opportunities for visualization of welding joint and its calculations.

Keywords: mathematical modeling, welding process, thermal model, finite elements method, modified finite elements method, manual arc welding simulator, welding joint visualization, estimation of joint parameters, real-time processing, thermal flow calculation.