

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 004.94

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ЯЗЫКА
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ ПО
МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ ПРОЦЕССА СВАРКИ В
МУЛЬТИМЕДИЙНОМ ТРЕНАЖЕРЕ РДС**

© 2018 В.В. Кривин, В.А. Толстов, И.О. Ишигов

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

В статье рассматривается разработка компьютерной программы для реализации комплекса математических моделей для расчётов параметров виртуального процесса сварки и геометрических характеристик виртуального сварного соединения в режиме реального времени. Показано представление каждой модели комплекса в виде диаграмм унифицированного языка моделирования – современного средства поддержки разработки компьютерных программ. В результате основанной на нём разработки получены программы, выполняющие визуализацию сварного соединения и другие задачи.

Ключевые слова: математическое моделирование, сварочный процесс, тепловая модель, метод конечного элемента, инженерия компьютерных программ, тренажёр ручной дуговой сварки, унифицированный язык моделирования, диаграмма прецедентов, диаграмма классов, диаграмма деятельности, визуализация.

Поступила в редакцию 26.02.2018

Информационно измерительная система (ИИС) для моделирования процесса ручной дуговой сварки включает аппаратные и программные модули. Математические модели, построенные в ходе исследования [1, 2], должны быть реализованы с помощью методов объектно-ориентированного программирования (ООП). При этом работа с устройствами ввода-вывода осуществляется посредством подключаемых модулей. Для реализации ИИС необходимо выбрать объектно-ориентированный язык программирования и среду разработки программ с поддержкой подключаемых модулей. Результатом разработки является основа для мультимедийных тренажёров РДС.

Рассмотрим задачу реализации модели формирования сварного шва на примере плоских деталей на основе модифицированного метода конечных элементов (ММКЭ) [1]. Модель на основе модифицированных конечных элементов (КЭ) представляет общий объём плиты в виде совокупности стержневых элементов малых объёмов, как показано на рисунке 1.

В расчётах используются следующие величины: Q_p и $Q_{тв}$ – количество тепла в расплаве и твердой части стержня (Дж); $c_{рп}$ и $c_{р_{тв}}$ – объёмная теплоёмкость расплава и твердой части стержня (Дж/(м³·°К)); l – размер клетки сетки (м); h_p и $h_{тв}$ – высоты расплава и твердой части стержня соответственно (м); θ_p , $\theta_{тв}$ и $\theta_{пл}$ – температуры верхнего, нижнего и среднего слоев соответственно (°К).

Перед началом моделирования во всех КЭ задаются начальные условия: температура, равная температуре окружающей среды, и соответствующее ей

теплосодержание. При тепловом воздействии дуги хотя бы на один КЭ в нём изменяется количество теплоты, следовательно, изменяется его температура. Для определения зоны влияния дуги необходимы данные о её пространственном положении и тепловой мощности. Их предоставляет модель расчёта основных контролируемых параметров сварочного процесса [2]. На отдельном шаге моделирования каждый элемент может находиться в полностью твёрдом, частично расплавленном и полностью расплавленном состоянии.

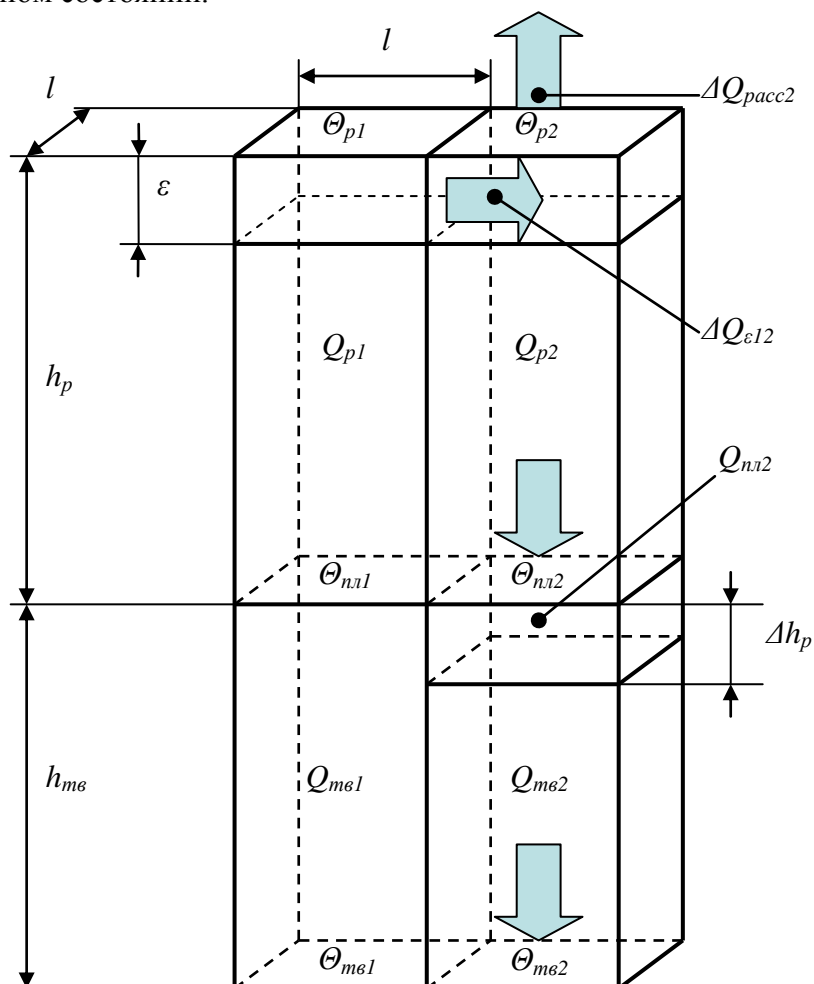


Рис. 1. – Деление на стержневые конечные элементы [Division by rod end elements]

Количество тепла в расплавленной и твердой частях стержня равно:

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

$$Q_{mε} = c\rho_{mε} l^2 h_{mε} (\Theta_{mε} + \Theta_{нл})/2. \quad (2)$$

При изменении температур стержней возникает теплопередача между ними. Этот этап в модели назван этапом горизонтальной передачи. При этом рассматриваются тепловые потоки следующего вида:

$$\Delta Q_{12p} = \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{(\Theta_{1p} - \Theta_{2p})}{l}. \quad (3)$$

где ΔQ_{12} – тепло переданное от стержня 1 к стержню 2 (Дж);

Δt – временной шаг моделирования (сек);

λ_p – теплопроводность расплава (Вт/(м·°К));

Δh – толщина рассматриваемого слоя (м);

Θ_{1p} – температура верхней поверхности расплава в стержне 1 (°С);

Θ_{2p} – температура верхней поверхности расплава в стержне 2 (°С).

Теплообмен между нижними частями стержней описывается аналогично, в соответствующих формулах изменяются только физические свойства.

Степень расплавления моделируется перемещением по вертикали границы раздела фаз – среднего слоя с температурой $\Theta_{нл}$. Перемещение рассчитывается на втором этапе вертикальной теплопередачи:

$$\Delta h_p = -\Delta t \frac{\lambda_p (\Theta_p - \Theta_{нл}) / h_p + \lambda_{ме} (\Theta_{ме} - \Theta_{нл}) / h_{ме}}{c_{нл}}. \quad (4)$$

где $c_{нл}$ – удельная теплота плавления (дж/м³).

Статическую структуру компьютерной модели можно представить в виде диаграммы классов унифицированного языка моделирования UML. Между классами можно определить отношение композиции, которое означает, что вместе с объектом-целым уничтожаются его объекты-компоненты [3]. Это обоснованно тем, что при удалении из памяти ЭВМ объекта класса «Плита» действительно удаляются все составляющие его КЭ. Кроме этого, на диаграмме классов изображаются свойства и методы классов [4]. Свойствами плиты в целом являются размеры и физические величины, используемые в формулах (1÷4). Классу «Плита», помимо реализуемого средствами среды программирования метода-конструктора, требуются методы «инициализировать модель» и «выполнить шаг моделирования».

На рисунке 2 представлена диаграмма классов UML, отражающая описанные свойства и методы классов и отношения между ними.

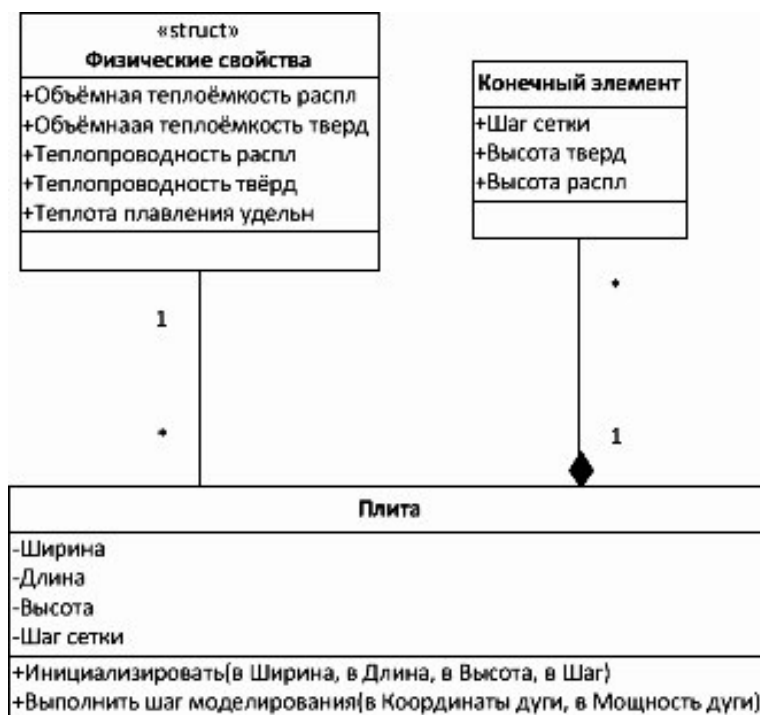


Рис. 2. – Диаграмма классов для модели плиты [Class diagram for the plate model]

Данный вид диаграмм позволяет описывать только статические структуры моделируемой системы. В данном случае это организация хранения объектов в памяти ЭВМ. Поведение системы в UML чаще всего описывается диаграммами взаимодействий, последовательностей и деятельностей [5]. При этом диаграммы деятельностей имеют много общего с блок-схемами алгоритмов, но обладают более широкими возможностями визуализации. Используем эти диаграммы для описания методов. Метод «инициализировать модель» соответствует линейному алгоритму из нескольких простых действий: создаётся сетка конечных элементов (КЭ) заданных размеров и в каждом из них задаётся положение границы фаз, совпадающее с верхней поверхностью. Такое положение означает отсутствие расплавленной части. Также вычисляется теплосодержание по формуле (2) при температуре всех слоёв равной температуре окружающей среды 20°C и высотах $h_p = 0$ и $h_{mv} = h$, h – высота плиты (м).

Метод «выполнить шаг моделирования» выполняет все математические расчёты, заложенные в модель. Данный метод сложнее, так как модель работает циклически, на каждом шаге выполняя расчёт по формулам (1÷4). Кроме обмена тепловой энергией, в модели также рассчитывается перенос расплава между КЭ. Диаграмма деятельности на отдельном шаге моделирования представлена на рисунке 3.

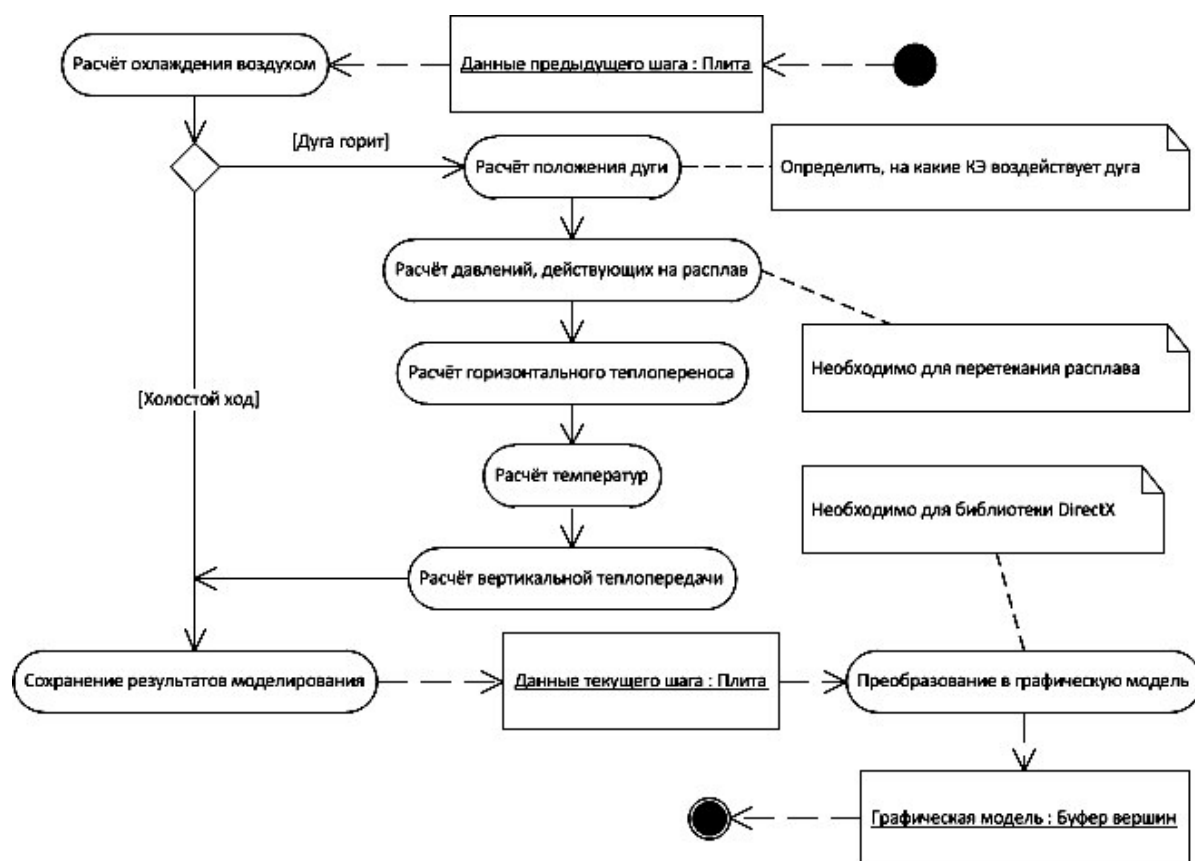


Рис. 3. – Диаграмма деятельности на каждом шаге моделирования
[Diagram of activity at each simulation step]

На данной диаграмме укрупнённо отражены основные этапы расчётов по модели. При этом сплошными стрелками показаны переходы от одной деятельности к другой, а пунктирными – взаимодействия с объектами в памяти ЭВМ. Первые называются потоками управления, вторые – потоками объектов [3, 6].

Также необходимо упомянуть модель капельного переноса при сварке плавлением. Характеристики и параметры процесса переноса оказывают существенное

влияние на формирование сварного соединения. Поэтому для получения модели капельного переноса при сварке плавлением было проведено отдельное исследование [7]. В результате этого исследования с помощью численных экспериментов установлено, что длина межкапельных промежутков (при капельном переносе) в процессе РДС как случайная величина подчиняется закону распределения, являющемуся смесью экспоненциального распределения и распределений Рэлея. Это в свою очередь, дает возможность определить моменты отрыва капель и, как следствие, сформировать поток команд управления приводом имитации плавления электрода. Диаграмма деятельности представлена на рисунке 4.

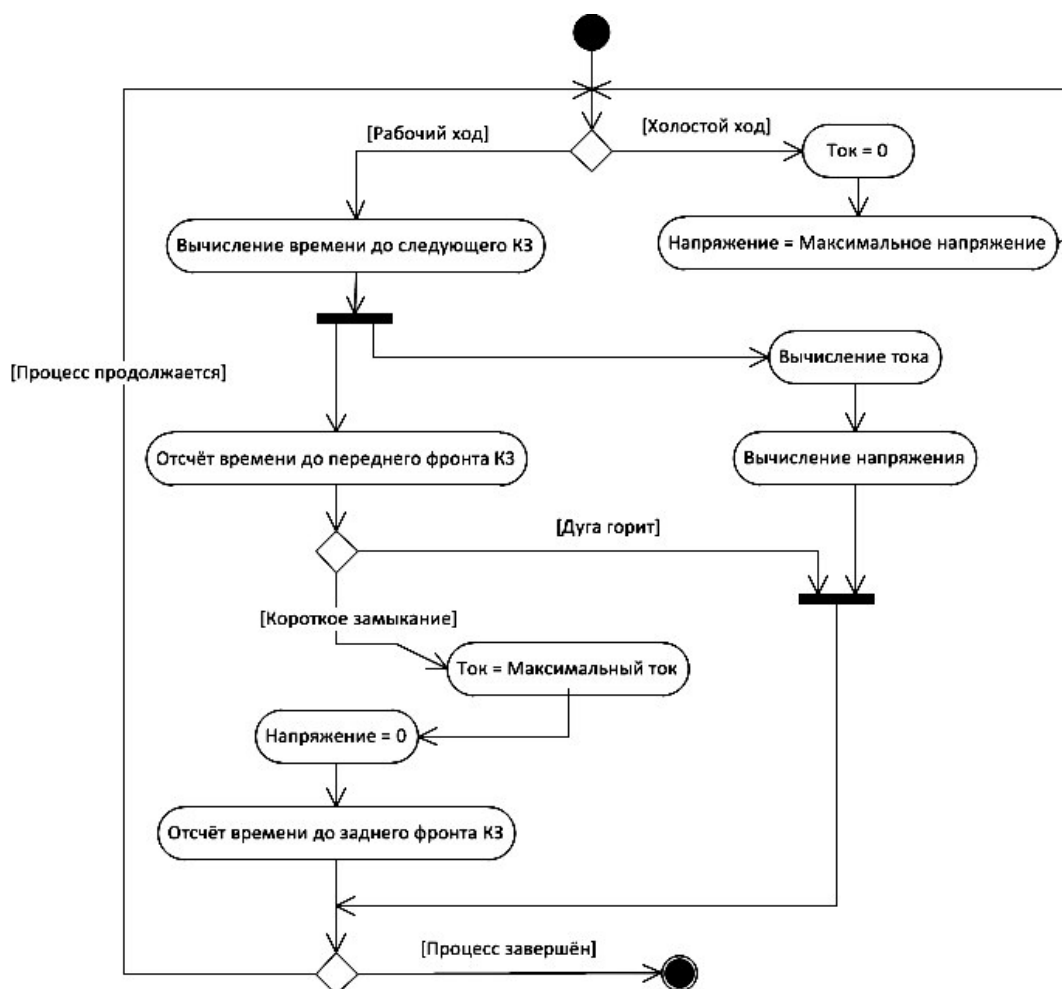


Рис. 4. – Диаграмма деятельности для моделирования капельного переноса
[Activity diagram for drip transfer modeling]

Пример визуализации сварного шва средствами компьютерной графики представлен на рисунке 5 [8, 9]. Программа реализована на языке С [10].

Использование унифицированного языка моделирования UML в процессе разработки программного обеспечения для компьютерного тренажёра ручной дуговой сварки позволило решить ряд задач. Во-первых, использование этой нотации облегчает обсуждение технических решений отдельными инженерами-программистами. Во-вторых, разработанные ранее математические модели составляющих сварочного процесса переведены в знаковые модели, отражающие особенности их программной реализации. В-третьих, полученные диаграммы можно изменять и уточнять методом декомпозиции для дальнейшей модификации программного обеспечения.

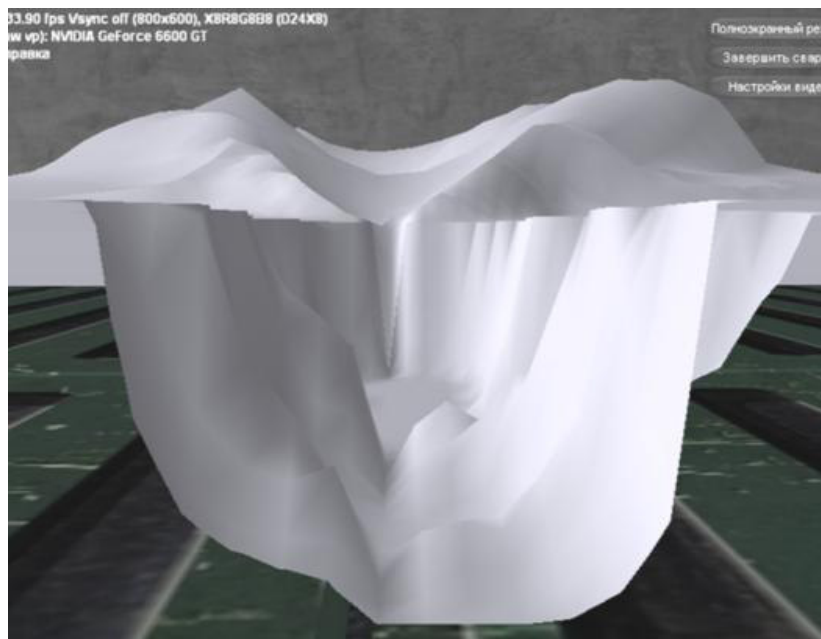


Рис. 5. – Поперечный разрез визуализации сварного шва [Cross section of welded joint visualization]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривин, В.В. и др.* Модель стержневых конечных элементов для теплового расчёта виртуального сварного шва [Текст] / В.В. Кривин, М.Ю. Виниченко, В.А. Толстов // Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий : материалы IV Всерос. науч.-практ. (заоч.) конф. (Москва, 27-29 апр. 2011 г.) – М.: НИИРРР, 2011. – С. 89–94.
2. *Кривин, В.В. и др.* Моделирование сигналов параметров виртуального сварочного процесса [Текст] / В.В. Кривин, С.М. Виниченко, В.А. Толстов и др. // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2014. – Т.3. – №1. – С. 53–57.
3. *Самуйлов, С.В.* Объектно-ориентированное моделирование на основе UML : учебное пособие [Электронный ресурс] / Самуйлов С.В. – Электрон. текстовые данные. – Саратов : Вузовское образование, 2016. – 37 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47277>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю.
4. *Малышева, Е.Н.* Проектирование информационных систем. Раздел 5. Индустриальное проектирование информационных систем. Объектно-ориентированная Case-технология проектирования информационных систем : учебное пособие [Электронный ресурс] / Малышева Е.Н. – Электрон. текстовые данные. – Кемерово : Кемеровский государственный университет культуры и искусств, 2009. – 70 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22067>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю.
5. *Буч, Г. и др.* Язык UML. Руководство пользователя [Электронный ресурс] : рук. / Г. Буч, Д. Рамбо, И. Якобсон. – Электрон. дан. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 496 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/1246>. – ЭБС «Лань», по паролю.
6. *Бабиц, А.В.* UML. Первое знакомство. Пособие для подготовки к сдаче теста UM0-100 (OMG Certified UML Professional Fundamental) [Электронный ресурс]: учебное пособие / Бабиц А.В. – Электрон. текстовые данные. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), 2008. – 176 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/15858>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю.
7. *Сысоев, Ю.С. и др.* Моделирование плавления электрода при разработке компьютерных 3D-тренажеров для обучения ручной дуговой сварке [Текст] / Ю.С. Сысоев, В.В. Кривин, В.А. Толстов // Сварочное производство. – 2017. – №10 – С. 12-17.
8. *Виниченко, М.Ю. и др.* Уточненная математическая модель сварного шва для мультимедийного тренажера сварщика [Текст] / М.Ю. Виниченко, И.О. Ишигов, В.В. Кривин и др. // Сварочное производство. – 2015. – №11. – С. 17–20.
9. *Кривин, В.В. и др.* Расчёт параметров виртуального сварного шва в тренажёре сварщика [Текст] / В.В. Кривин, М.Ю. Виниченко, В.А. Толстов // Безопасность АЭС и подготовка

кадров : тез. докл. XII Междунар. конф. (Обнинск, 4-7 окт. 2011 г.). – Обнинск, 2011. – С. 110–112.

10. Биллиг, В.А. Основы объектного программирования на C# (C# 3.0, Visual Studio 2008) [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Биллиг. – Электрон. текстовые данные. – М., Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Вузовское образование, 2017. – 583 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/72339.html>

REFERENCES

- [1] Krivin V.V., Vinichenko M.Y., Tolstov V.A. Model' sterzhnevyyh konechnyyh elementov dlya teplovogo raschyota virtualnogo svarnogo shva [The model of rod finite elements for thermal calculation of the virtual welding joint] [Actual Problems of Development of Modern Science, Engineering and Technology : Materials of the IV vseros. science-practical conference. (Moscow, 2011, April, 27-29)], 2011, ISBN 978-5-903967-35-3, pp. 83–94. (in Russian)
- [2] Krivin V.V., Vinichenko S.M., Tolstov V.A. etc. Modelirovanie signalov parametrov virtualnogo svarochogo processa [Modeling of parametric signals of virtual welding process]. Vestnik natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI» [Bulletin of the National Research Nuclear University "MEPhI"], 2014, Vol.3, №1, ISSN 2304-487X, pp. 53–57. (in Russian)
- [3] Samuilov S.V. Obektno-orintirovannoe modelirovanie na osnove UML [UML-based object-oriented modeling]. Vuzovskoe obrazovanie [University education], 2016, 37 p. Available at: <http://www.iprbookshop.ru/47277> (in Russian)
- [4] Malysheva E.N. Proektirovanie informatsionnyh system. Razdel 5. Industrial'noe proektirovanie informacionnyh system. Ob'ektno-orientirovannaya Case-tehnologiya proektirovaniya informacionnyh system [The development of information systems. Chapter 5. The industrial development of information systems. The object-oriented Case-technology for development of information systems]. Kemerovo. Kemerovo State University of Culture and Art, 2009, 70 p. Available at: <http://www.iprbookshop.ru/22067> (in Russian)
- [5] Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. Yazyk UML. Rukovodstvo polzovatelya [UML Language. User's guide]. M. Pub. DMK Press, 2008, ISBN 5-94074-334-X, 496 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/1246>. (in Russian)
- [6] Babich A.V. UML. Pervoe znakomstvo. Posobie dlya podgotovki k sdache testa UM0-100 (OMG Certified UML Professional Fundamental) [UML. The first acquaintance. The tutorial to prepare for the UM0-100 test (OMG Certified UML Professional Fundamental)]. M. Pub. BINOM. The laboratory of knowledge, Internet-university of Information Technology (INTUIT), 2008, ISBN 978-5-94774-878-9, 176 p. Available at: <http://www.iprbookshop.ru/15858>. (in Russian)
- [7] Sysoev Y.S., Krivin V.V., Tolstov V.A. Modelirovanie plavleniya elektroda pri razrabotke komputernyyh 3D-trenazhorov dlya obucheniya ruchnoi dugovoi svarke [The modeling of node molding during development of 3D computerized simulators for manual arc welding training]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 2017, №10, ISSN 0491-6441, pp. 12–17. (in Russian)
- [8] Vinichenko M.Y., Ishigov I.O., Krivin V.V. etc. Utochnyonnyaya matamaticeskaya model svarnogo shva dlya multimedijnogo trenazhora svarschika [The refined welding joint model for multimedia training system]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 2015, №11, ISSN 0491-6441, pp. 17–20. (in Russian)
- [9] Krivin V.V., Vinichenko M.Y., Tolstov V.A. Raschyot parametrov virtual'nogo svarnogo shva v trenazhore svarschika [The calculation of virtual welding joint in multimedia training system] [Nuclear power plant safety and personnel training : Materials of the XII International conference. (Obninsk, 2011, 4-7 of April)], 2011, pp. 110–112. (in Russian)
- [10] Billing V.A. Osnovy obektnogo programmirovaniya na C# (C# 3.0, visual Studio 2008) [The basis of object-oriented programming in C# (C# 3.0, visual Studio 2008)]. M., Saratov. Pub. Internet-university of Information Technology (INTUIT), Vuzovskoe obrazovanie [University education], 2017, ISBN 978-5-4487-0145-0, 583 p. Available at: <http://www.iprbookshop.ru/72339> (in Russian)

The Utilization of Unified Modeling Language to Realize the Welding Process Mathematical Modeling Calculations in Multimedia MAW Simulator

V.V. Krivin*, V.A. Tolstov**, I.O. Ishigov***

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

**ORCID: 0000-0003-0903-0786*
WoS ResearcherID: E-2267-2018
e-mail: vvkkrivin@mephi.ru ;
***ORCID: 0000-0001-7144-5195*
WoS ResearcherID: F-1032-2017
e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru ;
****ORCID: 0000-0002-5829-6989*
WoS ResearcherID: E-2448-2018
e-mail: ioishigov@mephi.ru

Abstract – The article deals with computer program development to realize the complex of mathematical models for real-time calculations of virtual welding parameters and virtual welding joint geometric properties. The representation of each model of complex as unified modeling language diagram, this modern support tool for computer program development, is shown. The development based on it causes the result as programs for visualization of welding joint and other purposes.

Keywords: mathematical modeling, welding process, thermal model, finite element method, engineering of computer program, manual arc welding simulator, unified modeling language, use case diagram, class diagram, activity diagram, visualization.