

Р. А. Рзаев¹, Л. М. Гуревич²

**МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА
ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ***

¹ Астраханский государственный университет

² Волгоградский государственный технический университет
e-mail: radmir.82@mail.ru

Численное моделирование процесса сварки трением с перемешиванием (СТП) является сложной задачей из-за многочисленных сложностей. Это полностью связанная термомеханическая задача, которая включает в себя большую пластическую деформацию, тепловой поток, нелинейный контакт и трение. Точное моделирование процесса СТП позволит лучше понять поток материала и распределение температуры во время процесса, что важно для оптимизации параметров процесса и уменьшения вероятности возникновения дефектов сварного шва при СТП. Рассмотрены различные подходы к моделированию распределения температуры и материала в процессе СТП, такие как подход Эйлера или Лагранжа, гидродинамика более гладких частиц (SPH), объединенные методы Эйлера и Лагранжа (CEL), произвольные методы Лагранжа и Эйлера (ALE).

В этой работе промоделированы методом конечных элементов с использованием подходов CEL и ALE распределение температуры и материала во время процесса СТП разнородного соединения алюминия и меди. Кроме того, показано, что распределение температуры вдоль линии сварки асимметрично: максимальная температура на наступающей стороне выше, чем на отступающей.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, разнородные соединения, математическое моделирование, алюминиевый сплав, медный сплав.

R. A. Rzaev¹, L. M. Gurevich²

**METHODS FOR MODELING THE TEMPERATURE AND MOVEMENT
OF THE MATERIAL DURING FRICTION STIR WELDING**

¹ Astrakhan State University

² Volgograd State Technical University

Numerical modeling of the friction stir welding (FSW) process is challenging due to numerous complexities. This is a fully coupled thermomechanical problem that involves large plastic deformation, heat flow, nonlinear contact, and friction. Accurate modeling of the FSW process will provide a better understanding of the material flow and temperature distribution during the process, which is important for optimizing process parameters and reducing the likelihood of weld defects during FSW. Various approaches to modeling the temperature and material distribution in the FSW process are considered, such as the Euler or Lagrange approach, smoother particle hydrodynamics (SPH), coupled Euler and Lagrange methods (CEL), and arbitrary Lagrange and Euler methods (ALE).

In this work, temperature and material distributions during the FSW process of a dissimilar aluminum-copper joint were simulated by finite element analysis using CEL and ALE approaches. In addition, it was shown that the temperature distribution along the weld line is asymmetrical: the maximum temperature on the advancing side is higher than on the retreating side.

Keywords: friction stir welding, dissimilar joints, mathematical modeling, aluminum alloy, copper alloy.

Моделирование термических и деформационных процессов при сварке трением с перемешиванием (СТП) представляет собой сложную задачу, которая включает физические взаимосвязи между кинетикой перемещения свариваемого материала и теплопередачей, величиной и скоростью деформации в области влияния сварочного инструмента (СИ). Различными авторами были разработаны методы численного моделирования, которые могут объяснить и предсказать важные особенности физики процессов, связанных с СТП. При этом значительно меняется диапазон сложности создаваемых моделей СТП, от простых моделей теплопроводности и потока металла, к связанным моделям, в которых вязкопластический поток и теплопередача моделируются для прогнозирования распределения температуры и остаточных напряжений в шве. В отдельных численных моделях были исследованы следующие явления: тепловыделение при сопряженном трении; развитие зоны проскальзывания пластического течения; трехмерная картина потока тепла и материала. В работе [1] разработан закон масштабирования для подводимого тепла от времени: расчетная максимальная температура была оценена с помощью масштабного анализа и сравнена с экспериментальными результатами, приведенными в работе [2].

Технологические этапы СТП представляет собой мультифизическую проблему, связанную с высокой деформацией материала и тепловым потоком [3–8, 18–21]. Во время СТП на распределение температуры, течение материала и образование дефектов большое влияние оказывают параметры сварки, геометрия инструмента и конструктивные элементы сварного соединения [22–28].

Для моделирования процессов СТП используют метод конечных элементов (МКЭ) [9–11], метод конечных разностей (МКР) [10–12] и бессеточные методы (БСМ) [14–17, 31].

Существуют различные подходы к моделированию распределения температуры и материала в процессе СТП, такие как подход Эйлера или Лагранжа, гидродинамика более гладких частиц (SPH), объединенные методы Эйлера и Лагранжа (CEL), произвольные методы Лагранжа и Эйлера (ALE) для моделирования

термомеханического поведения свариваемых материалов в процессе СТП [7, 29]. При использовании метода ALE для моделирования процесса СТП сетка внутри области может произвольно перемещаться через границы для поддержания оптимальной формы элемента. Метод ALE и адаптивное построение сетки, позволяющее сетке перемещаться независимо от материала, обычно используются для предотвращения искажения сетки.

Подход ALE позволяет материалу вести себя произвольно, но не может полностью предотвратить повторное перестроение сетки. Таким образом, ALE подходит для анализа на локальном уровне, например, в зоне перемешивания. Это выполняется путем отдельного перемещения сетки и точек материала, что позволяет избежать необходимости в отдельной операции повторного создания сетки. Недостатком этого процесса является корректировка материальных уравнений для учета относительного движения между отдельным материалом и перемещением сетки [22]. Кроме того, возникает необходимость использования мелкой сетки в области деформации для предотвращения чрезмерного искажения сетки, что приводит к увеличению времени вычислений по сравнению с методом CEL [24].

Подход CEL предусматривает рассматривание подложки как эйлеровой области, а инструмент как лагранжево тело. Это позволяет лагранжевому корпусу инструмента погружаться в заготовку на границе раздела инструмент-заготовка без искажения сетки [30]. Поскольку материал течет через эйлерову область, требования к мелкой сетке в области деформации можно избежать [26]. Эйлерова область разделена на область заготовки и пустоту, чтобы удерживать поток материала из области заготовки [27] (рис. 1).

Подход CEL применяется для моделирования разнородных процессов СТП [33]. Для сокращения вычислительных расчетов требуется использование масштабирования массы. Масштабирование массы связано с явной схемой интегрирования по времени, где квазистатическое моделирование включает в себя сильно нелинейные условия контакта между инструментом СТП и заготовкой. Взаимодействие

между эйлерово-лагранжевыми областями определяется методом Нох [30]. Перемещение лагранжевого тела за конечное время определяется на основе рассмотрения начального состояния лагранжевого материала. Давление и нормальные скорости материала непрерывны на границе Эйлера – Лагранжа с учетом условия скачка Рэнкина – Гюгонио.

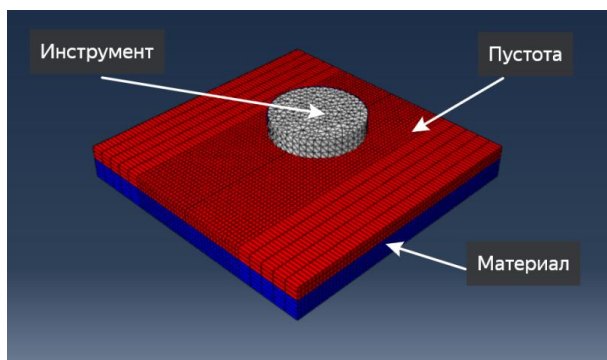


Рис. 1. Модель с использованием подхода CEL

Аналогично на границу лагранжевого тела действует величина давления, полученная в результате решения уравнений Эйлера [33]. Чтобы визуализировать поток материи, для отслеживания положения материала использовался алгоритм межфазной реконструкции на основе объема жидкости, называемый эйлеровой объемной долей (ЭОД) [30]. Соответственно, ЭОД отслеживает поток материала, индексирова единицу, когда элемент полностью заполнен, и считает зону равной нулю для пустой области. Переменные уравнения Лагранжа корректируются с учетом потока материала с помощью алгоритма транспортировки [34]. С целью учета пластического деформирования элементов материала использовалась модель пластичности Джонсона – Кука (ДК) (1), учитывающая эффекты изотропного упрочнения и изменение температуры:

$$\bar{\sigma}_s = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\bar{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (1)$$

где m – коэффициент термического размягчения, $\bar{\epsilon}$ и $\dot{\epsilon}_0$ – эффективная пластическая деформация и скорость деформации, A , B , C – константы, n – показатель наклепа, T_r и T_m – комнатная температура и температура плавления соответственно.

Уравнение нестационарной теплопроводности выражалось как

$$k(T) \times \nabla^2 T + \dot{Q} = \rho C_p(T) \times \dot{T}, \quad (2)$$

где $k(T)$ и $C_p(T)$ – теплопроводность и удельная теплоемкость свариваемого материала, которые зависят от температуры; ρ – плотность металла; $\dot{Q}$ – скорость внутреннего тепловыделения на единицу объема. Граничное взаимодействие в области решения уравнения теплопроводности выражалось

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} - q_s + h_{conv}(T - T_{amb}) + \omega \sigma_{sb}(T^4 - T_{amb}^4), \quad (3)$$

где k_n – нормальная теплопроводность с окружающей средой к поверхности пластины, q_s – поверхностный поток, h_{conv} – коэффициент конвективного теплообмена, ω – излучательная способность поверхности пластины, σ_{sb} – постоянная Стефана-Больцмана, T – температурная переменная, T_{amb} – температура окружающей среды.

Для моделирования температуры и перемещения металла использовались свариваемые образцы размером $40 \times 50 \times 3$ мм³. СИ выполнен в виде лагранжевого тела без острых углов на пине и заплечике (рис. 2) с диаметром заплечика 14 мм, пины 3 мм и длиной пины 2,89 мм.

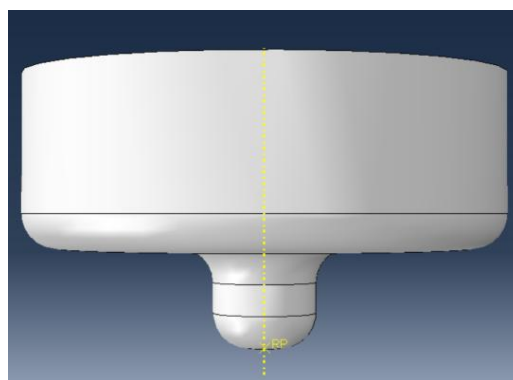


Рис. 2. Эскиз лагранжевого деформируемого СИ

Для упрощения расчетов использовали независимые от температуры значения теплофизических свойств свариваемых материалов. Для свариваемых образцов использовались эйлеровы ячейки типа EC3D8RT – восьмиузловой элемент с термической связью, обеспечивающий преимущества уменьшенной интеграции. Для пустоты применяли EC3D8R ячейки. В конечноэлементной сетке инструмента использована ячейка C3D10MT – 4-узловой термосвязанный тетраэдр. Разбиение на конечные ячейки инструмента и свариваемых образцов представлено на рис. 3.

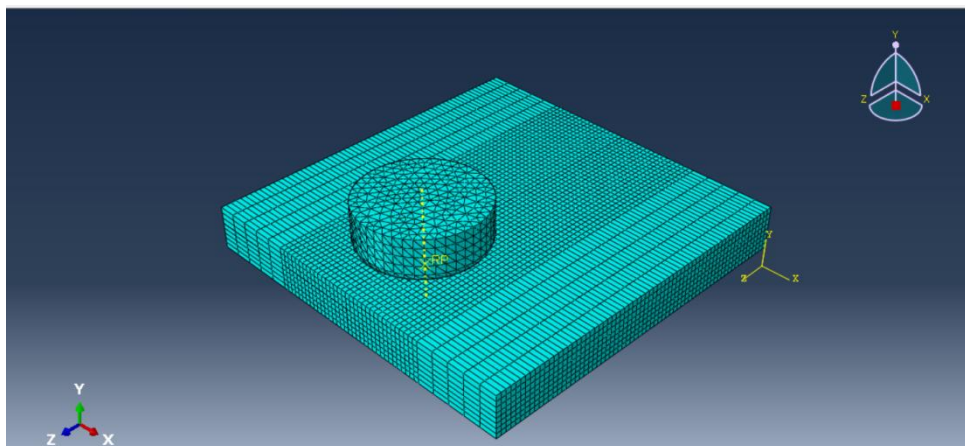


Рис. 3. Разбиение на элементы пластины и инструмент

Локальное сгущение сетки вблизи центральной зоны пластин было использовано для обеспечения условий получения точных результатов при меньшем времени вычислений. В целом, две свариваемые пластины содержали 14740 ячеек, тогда как для инструмента было использовано 6276 ячеек, а пустота содержит 8844 ячеек.

Основным недостатком подхода CEL является большие вычислительные затраты. Масштабирование массы позволяет разбить область решения на несколько небольших элементов. Масса элементов искусственно увеличивается для достижения большей эффективности вычислений, поскольку общее время вычислений является функцией плотности материала. Этот процесс эффективно уменьшает время расчета отдельного шага, возникающее при явной схеме решения модели конечных элементов. Взаимодействие инструмента и материала в процессе СТП представлено соотношением кинетической энергии (КЭ) к внутренней энергии (ВЭ). В квазистатической системе масштабный коэффициент массы (МКМ) системы обычно приемлем, если это соотношение ниже 10 % [29]. Такое низкое значение коэффициента гарантирует, что метод масштабирования массы не оказывает отрицательного влияния на точность решения.

Обычно масштабирование массы осуществляется за счет увеличения плотности материала. Приращение плотности выражается как:

$$\rho' = k_p \times \rho, \quad (4)$$

где ρ' – фиктивная плотность; k_p – коэффициент масштабирования, влияющий во сколько примерно раз будет сокращено время расчета ($k_m > 1$).

Коэффициент масштабирования k_m выбирается таким образом, чтобы силы инерции в правой части уравнения (5) оставались незначительными

$$\mu \times \nabla^2 \times u + (\lambda + \mu) \times \nabla \times \text{tr}(E) - \alpha \times \lambda \times \nabla \times T = \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где E – линейный тензор деформации; μ и λ – коэффициенты Ламе; T – температура; α – коэффициент термического расширения; u – вектор смещения; ρ – плотность; t – время; ∇ – оператор Набла; $\text{tr}(E)$ – след матрицы E .

При увеличении плотности в k раз происходит уменьшение времени расчета в $\sqrt{k}$ раз. Замена плотности ρ искусственной плотностью ρ' изменяет правую часть (5), что компенсируется введением искусственной удельной теплоемкости C_p' . Стабильный прирост времени для термического анализа изменяется на $C_p' = C_p \times k_C^{-1}$, k_n – коэффициент масштабирования теплоемкости; C_p – теплоемкость свариваемого материала.

Динамика распределения температуры с подходом ALE для алюминиевого сплава АД1 и чистой меди при следующих параметрах режима СТП (скорость вращения инструменты 800 об/мин, скорости сварки 63 мм/мин, угол наклона СИ 3°) представлена на рис. 4.

В процессе сварки алюминий находился на отступающей стороне, а медь на наступающей стороне. Ввод СИ происходил по серединной линии соприкосновения свариваемых образцов. На рис. 4 наблюдается несимметричное распределение температуры, что вызвано различиями в значениях теплофизических свойств алюминия и меди. Максимальное значение температуры на алюминии 370 °С и повышалось до 451 °С на меди.

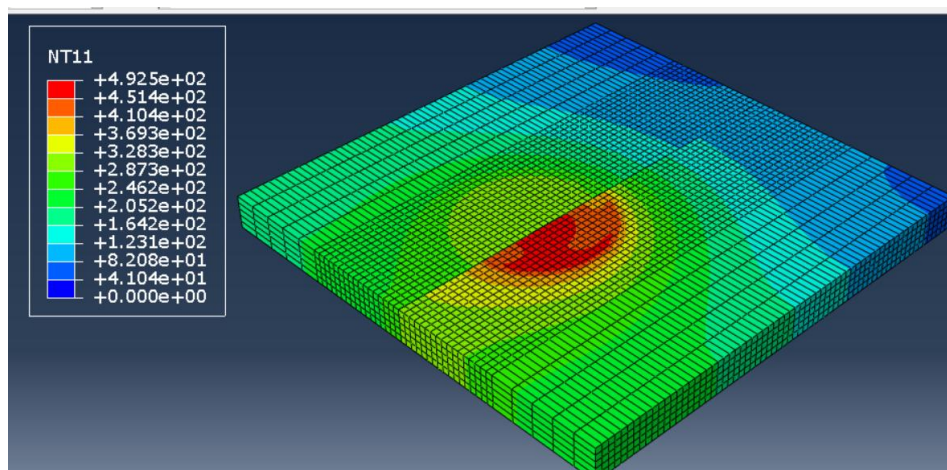


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности разнородного соединения (алюминий-медь) при подходе ALE

Метод CLE используется для исследования образования дефектов и перемещение материала сварного шва. Распределение температуры и

свариваемых металлов на поверхности сварных швов представлено на рис. 5.

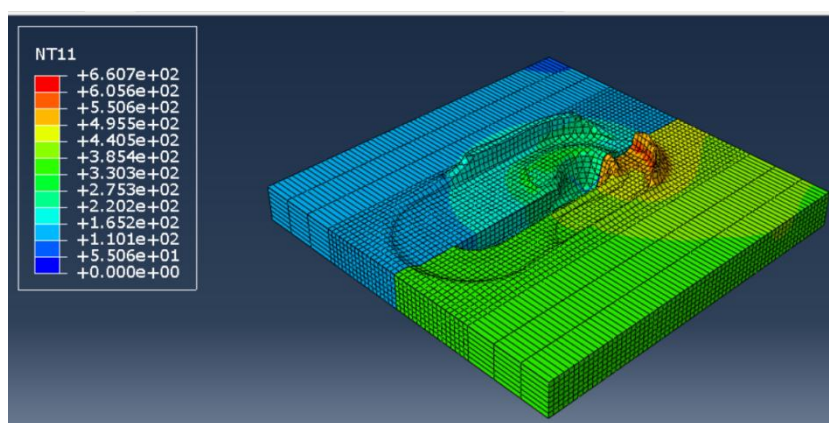


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности разнородного соединения (алюминий-медь) при подходе CLE

На поверхности образца наблюдаем поверхностный туннельный дефект и выдавливание свариваемого материала в виде грата. Пиковое значение температуры на меди составило 505 °С, а на алюминиевом сплаве 385 °С. Свариваемые металлы не достигают температуры перехода в пластическое состояние из-за низкой величины генерируемой тепловой мощности от СИ об поверхность образцов при скорости вращения СИ 800 об/мин.

Выводы

Некоторые аспекты моделирования процесса СТП до сих пор плохо изучены и требуют дальнейшего изучения. Методы моделирования могут быть полезны для лучшего понимания и визуализации влияния параметров СТП на

перемещение материального потока, распределение температурного поля, напряжений и деформаций в сварном шве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shercliff HR., Colegrove PA. Modelling of friction stir welding. In: Cerjak H., editor. Mathematical modeling of weld phenomenon A., vol. 6. London: Maney; 2002. pp. 927-74.
2. Colegrove PA., Shercliff HR. Development of Trivex friction stir welding tool Part 2 - three-dimensional flow modeling. Sci Technol Weld Join 2004;9: pp. 352-61.
3. M. Abbasi, B. Bagheri, R. Keivani, Thermal analysis of friction stir welding process and investigation into affective parameters using simulation, J. Mech. Sci. Technol. 29 (2) (2015) 861–866.
4. M. Song, R. Kovacevic. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation, Int. J. Mach. Tools Manuf. 43 (6) (2003) 605–615.

5. I. Alfaro, L. Fratini, E. Cueto, et al. Numerical simulation of friction stir welding by natural element methods, *Int. J. Mater. Form.* 1 (1) (2008) 1079–1082.
6. A. Tartakovsky, G. Grant, X. Sun, et al. Modeling of friction stir welding (FSW) process with smooth particle hydrodynamics (SPH), in: SAE 2006 World Congress, Detroit, USA., 2006.
7. Turkan M., Karakas U. Two different finite element models investigation of the plunge stage in joining AZ31B magnesium alloy with friction stir welding// *SN Applied Sciences.* - 2021.- №3(165).
8. Choudhary A. K., Jain R. Influence of stir zone temperature and axial force on defect formation and their effect on weld efficiency during friction stir welding of AA1100: A simulation and experimental investigation// *Materials Today Communications.* – 2023. -Volume 37.- 107413.
9. Salloomi K. N., Al-Sumaidae S. Coupled Eulerian–Lagrangian prediction of thermal and residual stress environments in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys// *Journal of Advanced Joining Processes.* - 2021.- №3, 100052.
10. Khan N.Z., Siddiquee A.N., Khan Z.A., Shihab S.K. Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys// *J. Alloy. Compd.* - 2015.- №648.- pp. 360–367.
11. Al-Badour F., Merah N., Shuaib A., A. Bazoune, Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes// *J. Mater. Process. Technol.* - 2013.- №213.- pp. 1433–1439.
12. Chaudhary A., Kumar Dev A., Goel A., Butola R., Ranganath, M.S. The mechanical properties of different alloys in friction stir processing: a/ Review, *Mater. Today Proc.* - 2018.- №5.- pp. 5553–5562.
13. Kashaev N., Ventzke V., Çam, G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications// *J. Manuf. Process.* - 2018.- №36.- pp. 571–600.
14. Aydin M., Bulut R. The weldability of AZ31 magnesium alloy by friction stir welding// *Met. Mater.* - 2010.- №48.- pp. 97–104.
15. Lee W.-B., Kim J.-W., Yeon Y.-M., Jung S.-B. The joint characteristics of friction stir welded AZ91D magnesium alloy// *Mater. Trans.* - 2003.- №44.- pp. 917–923.
16. Prasanna V., Kumar A.S., Babu P.R. Aspects of friction stir weldments of rare earth AE42 magnesium alloy// *Int. J. Appl. Eng.* - 2017.- №12.- pp. 6647–6652.
17. Jaiganesh V., Sevel P. Effect of process parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of AZ80A Mg alloy during friction stir welding// *Trans. Indian Inst. Met.* - 2015. - №68. – pp. 99–104.
18. Meyghani B., Awang M.B., Wu C.S. Thermal analysis of friction stir processing (FSP) using arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) and smoothed particle hydrodynamics (SPH) meshing techniques // *Mater. Werkst.* - 2020.- №51.- pp. 550–557.
19. Bagheri B., Abbasi M., Abdolazadeh A., Kokabi A.H. Numerical analysis of cooling and joining speed effects on friction stir welding by smoothed particle hydrodynamics (SPH)// *Arch. Appl. Mech.* - 2020.- №90.- pp. 2275–2296.
20. Noh V.F. University of California, Technical Report, Livermore, California.- 1963.
21. Fraser K., St-Georges L., Kiss L.I. Prediction of defects in a friction stir welded joint using the smoothed particle hydrodynamics method// *Proc. 7-th Asia Pac. IIW Inter. Cong.* - 2013.- pp. 474–479.
22. Fraser K., Kiss L.I., St-Georges L., Drolet D. Optimization of friction stir weld joint quality using a meshfree fully-coupled thermo-mechanics approach// *Metals.* - 2018.- №8, 101.
23. Guerdoux S., Fourment L. Error estimation and accurate mapping based ALE formulation for 3D simulation of friction stir welding// *AIP Conf. Proc.* - 2007.- №908.- pp. 185–190.
24. Wang X., Gao Y., McDonnell M., Feng Z. On the solid-state-bonding mechanism in friction stir welding// *Extrem. Mech. Lett.* - 2020.- №37, 100727.
25. Chauhan P., Jain R., Pal S.K., Singh S.B. Modeling of defects in friction stir welding using coupled Eulerian and Lagrangian method// *J. Manuf. Process.* - 2018.- №34.- pp. 158–166.
26. Huang Y., Xie Y., Meng X., Li J., Zhou L. Joint formation mechanism of high depth-to-width ratio friction stir welding// *J. Mater. Sci. Technol.* - 2019.- №35.- pp. 1261–1269.
27. Ansari M. A., Samanta A., Behnagh R. A., Ding H. An efficient coupled Eulerian–Lagrangian finite element model for friction stir processing// *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* - 2019.- №101.- pp. 1495–1508.
28. Zhu Z., Wang M., Zhang H., Zhang X., Yu T., Wu Z. A finite element model to simulate defect formation during friction stir welding// *Metals.* - 2017.- №7, 256.
29. Memon S., Fydrych D., Fernandez A. C., Derazkola H. A., Derazkola H. A. Effects of FSW tool plunge depth on properties of an Al-Mg-Si alloy T-Joint: Thermomechanical modeling and experimental evaluation// *Materials.* - 2021.- №14. 4754.
30. Lorrain O., Serri J., Favier V., Zahrouni H., Hadrouz M. A contribution to a critical review of friction stir welding numerical simulation// *J. Mech. Mater. Struct.* - 2009.- №4.- pp. 351–369.
31. Zhu Y., Chen G., Chen Q., Zhang G., Shi Q. Simulation of material plastic flow driven by non-uniform friction force during friction stir welding and related defect prediction// *Mater. Des.* - 2016.- №108.- pp. 400–410.
32. Kamal M., Shah M., Ahmad N., Wani O.I., Sahari J. Study of crashworthiness behavior of thin-walled tube under axial loading by using computational mechanics// *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering.* - 2016.- Vol. 10.- №8.- pp. 1170–1175.
33. Зыбин, И. Н. Численное моделирование температурных полей при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава AA5083 / И. Н. Зыбин, М. С. Антохин // *Frontier Materials & Technologies.* - 2023.- № 1. с. 23- 32.
34. Huang Y., Xie Y., Meng X., Lv Z., Cao J. Numerical design of high depth-to-width ratio friction stir welding// *J. Mater. Process. Technol.* - 2018.- №252.- pp. 233–241.