

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

© 2023 г. В.И. Сырянкин<sup>1,\*</sup>, М.Д. Хильчук<sup>1,\*\*</sup>, С.А. Клестов<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: \*svi\_tsu@mail.ru; \*\*ma6a70@gmail.ru; \*\*\*klestov\_simon@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2023; после доработки 13.03.2023  
Принять к публикации 17.03.2023

Контроль прочности сварных соединений применяется во многих отраслях производства. Рентгеновская микротомография как метод неразрушающего контроля позволяет не только выявить наличие дефектов, но и классифицировать их и оценить размеры трещин и дефектов нетрещиноподобного типа (пор). В данной статье рассматривается неразрушающий контроль сварных соединений сплава алюминия 6061 Т6 с помощью компьютерной микротомографии и математической модели теплового процесса сварки, реализованной в ANSYS Workbench. Приводятся экспериментальные результаты работы рентгеновского микротомографа, произведена оценка размеров дефектов в данном образце. С помощью математической модели получены термические истории, при которых образовались дефекты.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, сварной шов, дефектоскопия, рентгеновский 3D-микротомограф, математическое моделирование.

DOI: 10.31857/S013030822304005X, EDN: YPDLFA

### ВВЕДЕНИЕ

Сварка алюминия применяется во многих отраслях промышленности и производства. Сварное соединений деталей необходимо на машинном производстве, в технических конструкциях. Кроме того, при длительной эксплуатации различных технических и энергетических комплексов могут возникать дефекты, которые будут критическими в данной отрасли и приводить к неисправной работе. Наиболее часто для сплавов алюминия применяется аргонодуговая сварка, в этом случае сварной шов имеет высокое качество по сравнению с другими методами сварки. Однако при несоблюдении подготовки, сборки и технологии сварки в сварном шве могут возникнуть дефекты, приводящие к браку [1]. Возникают такие дефекты, как трещины, поры, непровары, наплывы, смещение, подрезы и др. [2, 3]. При этом дефекты типа непроваров, смещений и подобных возникают из-за человеческого фактора либо внешних воздействий. Дефекты такого типа зачастую можно обнаружить внешним осмотром либо с помощью методов машинного зрения, которые применяются для автоматизации процесса на производствах [3]. Два основных вида дефектов, которые невозможно идентифицировать осмотром внешней поверхности шва, это внутренние трещины и поры.

Поскольку наличие дефектов в сварных швах может приводить к изменениям механических свойств материала и некорректной работе конечных конструкций, ставится задача эффективного контроля сварных соединений на ранних этапах производства. Поскольку с помощью визуально-измерительного контроля или контроля внешней поверхности сложно выявлять дефекты в размерном диапазоне десятых долей мм, то применяются методы неразрушающего контроля [2]. Рентгеновская 3D-микротомография позволяет без разрушения образца исследовать его внутреннюю структуру на микронном уровне [4—11].

В сравнении с другими методами неразрушающего контроля установлено, что контроль с помощью цифровой рентгеновской томографии позволяет выявлять трещиноподобные дефекты, мелкие сферические поры, грушевидные полости и др. [12, 13]. Рассматриваются такие дефекты как подрезы, которые располагаются вблизи сварного шва и проводится их численный анализ методом конечных элементов для оценки критических дефектов при усталостной нагрузке [14]. Исследуются дефекты, которые могут возникнуть при таких параметрах сварки, как напряжение, ток и скорость сварки. Так же возможно моделирование геометрии сварного шва на основе предсказания этих параметров сварки, ширина трещины может предлагаться для прогнозирования глубины трещины [15, 16, 18]. Рентгеновская компьютерная томография применяется как метод неразрушающего контроля для раздела зоны подложки и зоны проплавления в сварном шве алюминия, что важно для выявления непровара [17]. Предлагаются различные классификации дефектов сварных соединений, периодических структур дефектов, а также воздействующих факторов на

сварные соединения для разработки оптимальных расчетных схем сварных швов, так же для классификации дефектов по изображениям, полученным рентгеновским томографом, применяются методы с использованием сверточных нейронных сетей [19—22]. Исследуется зависимость наличия дефектов разных видов на механические свойства сварного шва и на его усталостную прочность в частности [23, 24].

Кроме того, для прогнозирования появления дефектов сварных швов важно изучить физический процесс образования сварного шва. В настоящее время используются различные модели движущегося источника тепла для расчета параметров теплового процесса сварки, к объемным источникам теплоты относятся источники с нормальным распределением по осям, эллиптические и сферические источники тепла [25]. В ходе сварки происходит плавление материала с фазовым переходом в жидкое состояние с большим выделением тепла, для такого процесса возможно составить математическую модель на основе уравнения теплопроводности и получить численное решение, которое можно сопоставить с экспериментальными данными образца [26—35]. Для моделирования процесса сварки активно используются математические модели, основанные на уравнении теплопроводности с граничными условиями конвекции и движущимся источником тепла, которые могут решаться методом конечных элементов с помощью ANSYS Workbench [28—33].

В качестве метода неразрушающего контроля в данной работе рассматривается рентгеновская 3D-микротомография. Используется рентгеновский микротомограф, обладающий повышенной точностью и быстроедействием восстановления и анализа трехмерной структуры объекта [7, 36]. Был подготовлен образец из сплава алюминия, на котором присутствует сварной шов, полученный методом аргонодуговой сварки или TIG (Tungsten Inert Gas) сварки. С помощью разработанного НИ ТГУ программного обеспечения для рентгеновского микротомографа получена реконструированная 3D-модель данного образца, которая позволяет получить количественную оценку размеров дефектов на данном образце.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально исследовали сварное соединение из сплава алюминия 6061 T6, которое получено на заготовке размерами  $250 \times 121 \times 2,4$  мм, длина сварного шва 242,68 мм. Сварное соединение получено методом TIG-сварки в Международной лаборатории «Систем технического зрения» НИ ТГУ. Сварка происходила при комнатной температуре ( $T = 22^\circ\text{C}$ ) в естественной воздушной среде с последующим охлаждением при этих же условиях. Изучали элемент сварного шва, который вырезан из основной заготовки. Размеры этого элемента  $16 \times 18 \times 2,4$  мм, при этом толщина сварного шва относительно плоскости вырезанного элемента суммарно равна 1,2 мм по обоим направлениям нормали к плоскости элемента. Внутреннюю структуру данного сварного элемента рассматривали рентгеновским микротомографом SkyScan 1172 в режиме 120 кВ, 10 Вт [4]. На рис. 1а представлен вырезанный элемент сварного шва для исследования на рентгеновском 3D-микротомографе, на рис. 1б представлена его реконструкция.

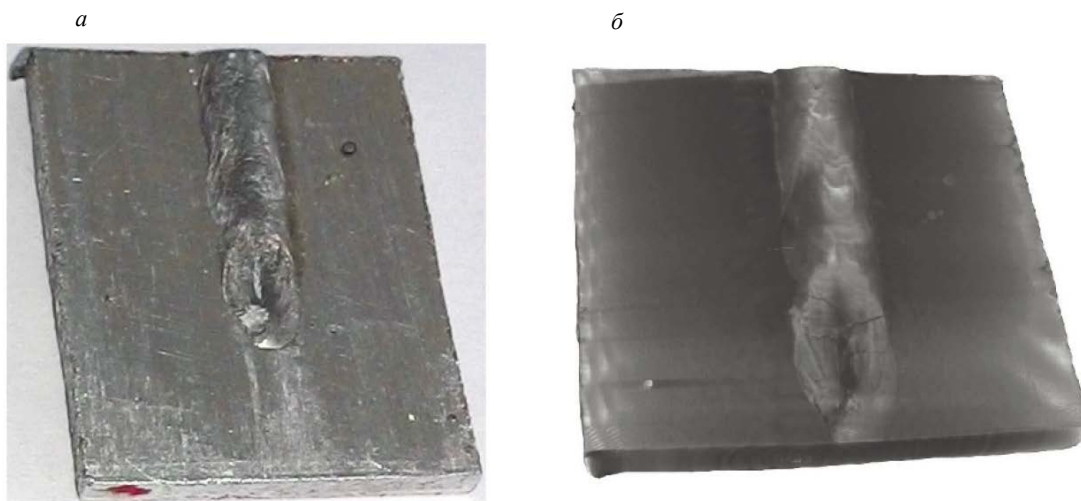


Рис. 1. Образец сварного шва: фотография вырезанного из заготовки элемента сварного шва сплава алюминия (а); 3D-реконструкция образца, полученная рентгеновским 3D-микротомографом (б).

В результате эксперимента было выявлено наличие дефектов, оценку размеров этих дефектов осуществляли с помощью программного обеспечения. Работа программного обеспечения заключается в сегментации дефекта на основе разной градации серого в пикселях среза полученного 3D-изображения и дальнейшем вычислении размеров дефектов при известном размере одного пикселя. Длина объекта находится по формуле:

$$l_o = \frac{g l_d}{H} = \frac{g w_d l_d}{H \sqrt{4H^2 + w_d^2}},$$

где  $w_d$  — ширина детектора;  $l_d$  — длина детектора;  $H$  — расстояние от трубки до детектора;  $g$  — расстояние от трубки до оси вращения исследуемого объекта.

Размер пикселя рассчитывается как произведение размера вокселя на геометрическое увеличение  $M$  ( $M = H/g$ ):

$$p = vM = v \frac{H}{g}.$$

Срезы изображений были получены в разных плоскостях, что позволило сделать выводы о распределении дефектов, их концентрации, а также классифицировать их [38].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается математическая модель процесса сварки, которая состоит из уравнения теплопроводности, конвекционных и радиационных граничных условий и движущегося источника тепла. В общем виде для декартовой системы координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v,$$

где  $c$  — теплоемкость материала;  $\rho$  — плотность;  $\lambda$  — теплопроводность материала;  $q_v = q(x, y, z, t)$  — функция, описывающая распределение удельной мощности объемного источника теплоты. Задается начальное условие в виде  $T(x, y, z, 0) = T_n = \text{const}$ ,  $T_n = 22$  °C. Общее время сварки составляет 100 с, время действия источника тепла — 50 с.

Граничные и радиационные условия конвекции задаются одновременно на всей поверхности заготовки кроме поверхности сварного шва:

$$\lambda \text{grad} T = \alpha(T - T_c);$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_w^4).$$

При этом  $q_{\text{rad}}$  задает тепловые потери за счет излучения. Движущийся источник тепла  $q$  имеет гауссовское распределение и задается только на поверхности сварного шва:

$$q = C_2 \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}{C_1^2} \right],$$

$(x_0, y_0, z_0)$  — координаты центра движущегося источника тепла;  $y_0 = v \times t$ ,  $x_0 = 0$ ,  $z_0 = 0$ , поскольку источник тепла движется только в направлении оси  $y$ ;  $C_1 = 0,002$  м — диаметр электрода,  $C_2 = 11 \times 10^7$  Вт/м<sup>3</sup> — удельная мощность источника; скорость сварки  $v = 0,005$  м/с [29, 32].

Для получения расчетов численной модели использовали программный пакет ANSYS Workbench 2022 R2, геометрия построена с помощью DesignModeler, ANSYS Mechanical применяли для построения конечно-элементной сетки, задания граничных и начальных условий и получения решения задачи методом конечных элементов. Количество узлов сетки 127152, количество элементов 80150, использовали тетраэдрическую сетку со сгущением вдоль сварного шва [37]. На рис. 2 представлена конечно-элементная сетка свариваемой пластины, полученная с помощью ANSYS Mechanical.

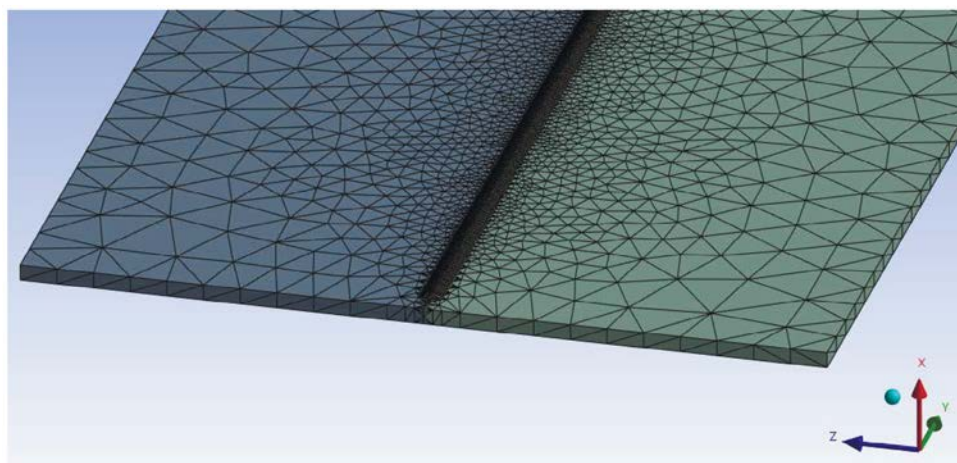


Рис. 2. Конечно-элементная сетка свариваемой пластины, полученная с помощью ANSYS Mechanical, зеленый и серый цвет — свариваемая пластина, оранжевый — сварной шов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

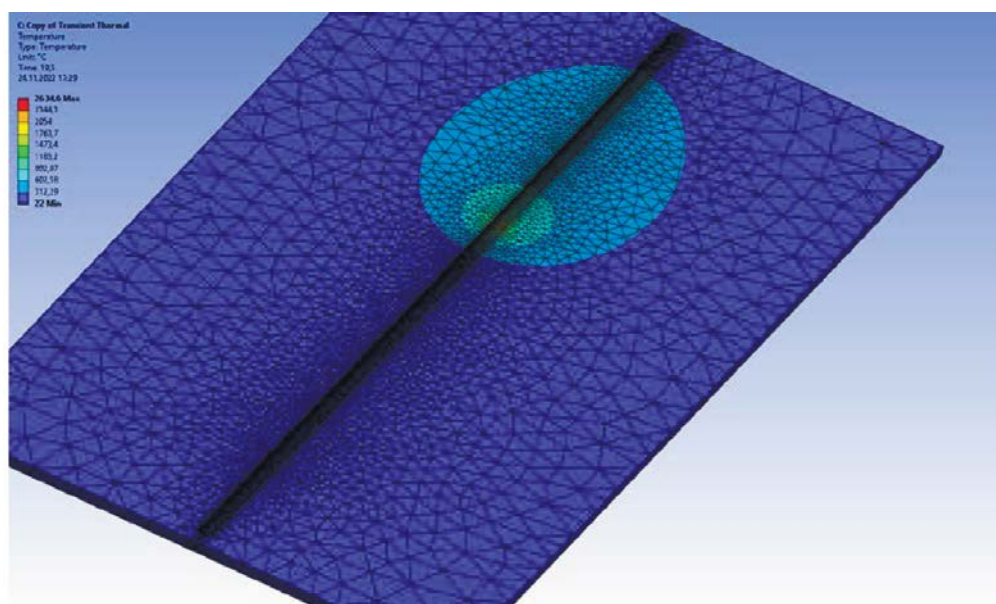


Рис. 3. Модельное поле температур в процессе сварки в момент времени  $t = 19,5$  с.

На рис. 3 представлено поле температур в процессе сварки, полученное с помощью программного пакета ANSYS Mechanical. Исследовали термические истории в трех точках начала сварного шва и в трех точках конца сварного шва (рис. 4). Расстояние между точками 1 и 2 равно 0,0006 мм, между точками 2 и 3 — 0,0028 мм. Между точками 4, 5 и 6 конца сварного шва расстояния такие же. На рис. 5 представлено модельное поле температур в конце сварки. Здесь видно, как температура меняется от комнатной и достигает максимума в конце процесса сварки. На рис. 6 представлены графики термической истории в начале сварного шва, точки 1, 2, 3.

На рис. 7 представлены графики термической истории в конце сварного шва, точки 4, 5, 6.

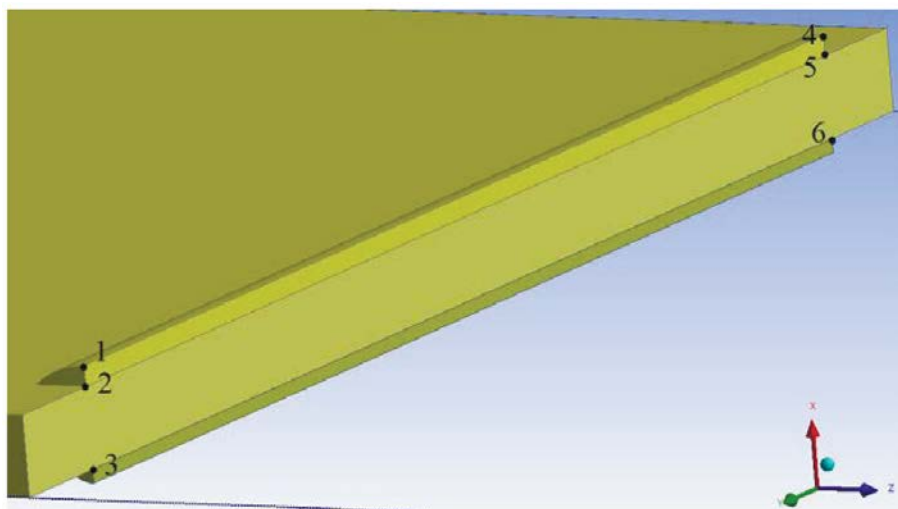


Рис. 4. Разрез сварного шва в плоскости XY: точки 1, 2, 3 — начало сварного шва; точки 4, 5, 6 — конец сварного шва.

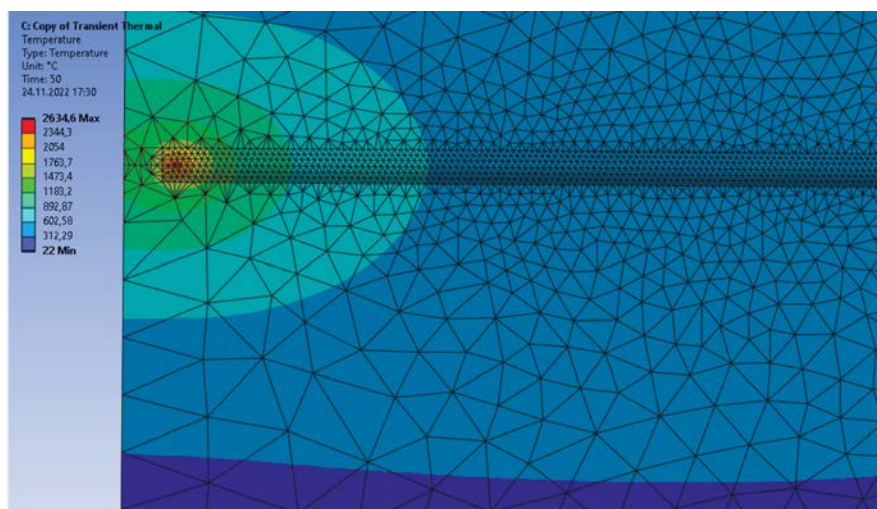


Рис. 5. Поле температур в конце сварки.

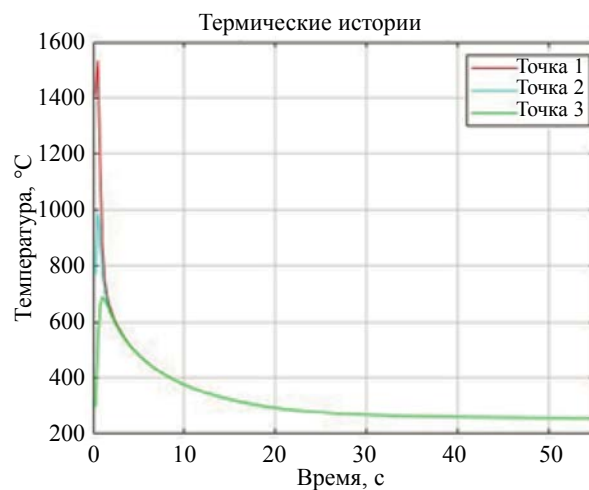


Рис. 6. Графики термической истории в начале сварного шва, точки 1, 2, 3.

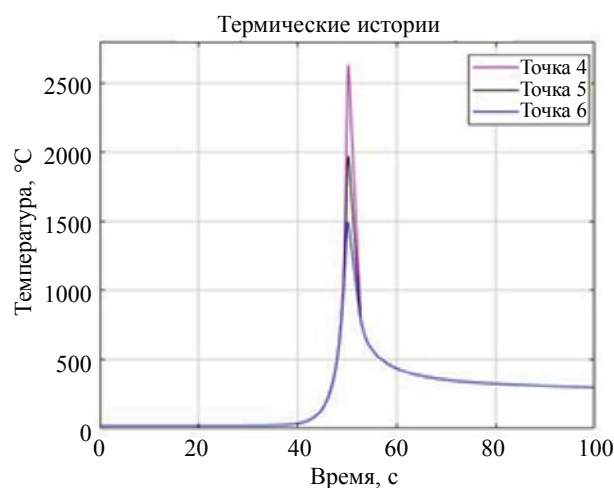


Рис. 7. Графики термической истории в конце сварного шва, точки 4, 5, 6.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Реконструкции получены в цветовой палитре, где каждому цвету соответствует разное значение плотности материала (рис. 8, 9).

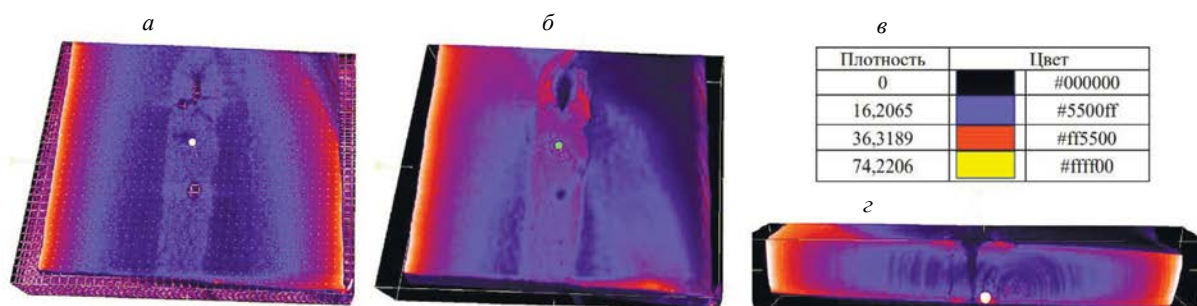


Рис. 8. Реконструкции элемента сварного шва: *a* — реконструкция образца в плоскости, которая соответствует точке 2 начала сварного шва и точке 5 конца сварного шва (см. рис. 4); *б* — реконструкция со срезом в плоскости, параллельной плоскости YZ; *в* — палитра цветов реконструкции; *г* — реконструкция сварного шва вдоль дефекта: кратер.

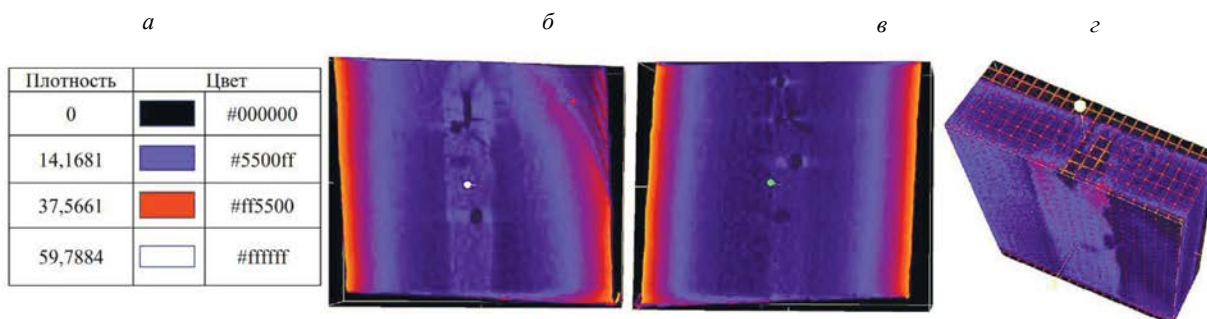


Рис. 9. Реконструкции элемента сварного шва: *a* — палитра цветов реконструкции; *б* — срез реконструированного сварного шва вблизи поверхности свариваемых пластин; *в* — реконструкция образца в плоскости, которая соответствует точке 3 начала сварного шва и точке 6 конца сварного шва (см. рис. 4); *г* — реконструкция сварного шва вдоль дефекта: кратер.

На рис. 8, 9 представлены трехмерные изображения вдоль внутренней структуры сварного шва и в плоскости, перпендикулярно самой пластине элемента образца. Изображения получены от начала сварного шва к его концу и вдоль плоскостей, на которых расположены точки.

На рис. 8а продемонстрирована реконструкция образца в плоскости, которая параллельна плоскости YZ (см. рис. 2) и проходит через две точки: точку 2 начала сварного шва и точку 5 конца сварного шва (см. рис. 4б). В соответствии с результатами математического моделирования получено, что в данной плоскости температура в процессе сварки менялась в диапазоне 689 — 2634 °С. Сетка реконструкции задана размером 0,5×0,5 мм. В данной плоскости наблюдаются дефекты типа пор и трещин, а так же кратер. Видно, что плотность материала образца увеличивается по мере приближения к его краю, что объясняется характером теплового воздействия на образец. На рис. 8б показана реконструкция со срезом в плоскости, параллельной плоскости YZ.

На рис. 8г представлена реконструкция в конце сварного шва, что соответствует плоскости, проходящей через точки 4, 5, 6 (см. рис. 4), перпендикулярно направлению сварного шва вдоль оси X. По результатам моделирования получено, что к концу сварки температура значительно выросла по сравнению с началом и составила 1489—2634 °С. Визуальный осмотр показывает наличие крупного кратера и с помощью рентгеновской реконструкции получено изображение его внутренней структуры. Кроме того, были получены реконструкции в другой цветовой палитре (рис. 9).

На рис. 10 представлены срезы, полученные с 3D-реконструкции элемента сварного шва в плоскости XZ, перпендикулярно направлению сварного шва в его конце. Срезы проведены по мере возрастания расстояния от края пластины, который ближе к концу сварного шва (точки 2, 4, 6) до середины кратера. С помощью встроенного программного обеспечения сделана оценка размеров дефектов сварного шва. Обнаружено, что имеются дефекты типа пор размерами 0,34 — 0,74 мм, трещины соответственно размерами 0,63 — 2,48 мм и так же оценен размер глубины кратера (см. рис. 8, 9), который составил 2,46 мм. При рассмотрении срезов трехмерной реконструкции сварного шва наблюдаются поперечные трещины, которые так же видны на рис. 8г. Продольные трещины отходят от кратера и находятся вблизи поверхности (рис. 8а, 8б, 9б, 9в). Преимущественно трещины и поры локализуются вокруг кратера.

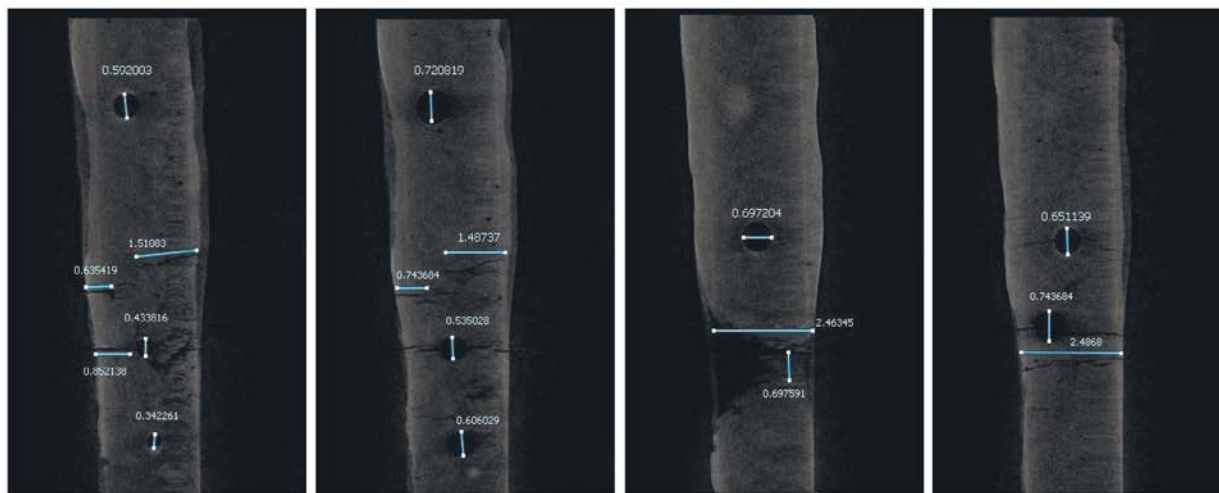


Рис.10. Срезы 3D-изображения элемента сварного шва в плоскости XZ, перпендикулярно направлению сварного шва в его конце.

Так же можно наблюдать, что дефект в виде поры, запечатленный на рис. 9 вблизи кратера, имеет пространственную структуру, согласно которой он имеет множество отходящих поперечных трещин. Далее, производя срезы 3D-изображения в плоскости XZ, перпендикулярно направлению сварного шва, можно наблюдать как рассматриваемый дефект уменьшился и вместе с тем появились поры достаточно крупных размеров (см. рис. 10). Кроме того, визуальный осмотр сварного шва показывает наличие брызг, полученных во время процесса сварки.

## ВЫВОДЫ

В данной работе использовалась рентгеновская 3D-микротомография как метод неразрушающего контроля применительно к конструкционным материалам. Исследовался сварной шов, полученный TIG-сваркой, на пластине из сплава алюминия 6061 Т6. Выявлено наличие таких дефектов, как трещины, поры, кратер и брызги, полученные во время сварки. Оценено их расположение относительно сварного шва и проведена оценка их размеров. Поиск дефектов и оценка их размеров осуществляли с помощью нейросетевых методов. Была составлена математическая модель на основе уравнения теплопроводности с конвективным и радиационными граничными условиями и гауссовским распределением движущегося источника тепла. Получено поле температур во время всего процесса сварки. В трех точках начала и конца сварного шва получены графики термической истории. По полученным термическим историям оценено, что температура в процессе сварки менялась от 689 °С в начале сварки до 2634 °С в конце. Распределение дефектов: в конце сварного шва имеется кратер размерами 0,5×2,0 мм, получена его реконструкция в плоскости, перпендикулярной пластине образца, кратер имеет характерные геометрические размеры. С помощью математического моделирования оценено, что температура, при которой получился такой дефект, была 1489—2634 °С. Так же наблюдаются дефекты смешанного типа: пора в совокупности с трещиной, такой дефект происходит из-за того, что пора была образована во время сварки, а при застывании шва вблизи поры образовалась трещина.

Таким образом, математическое моделирование теплового процесса сварки TIG методом в ANSYS Workbench позволяет получить значения термической истории в различных точках сварного шва, которые соответствуют физике протекаемого процесса. В конце сварки, согласно результатам математического моделирования, максимальная температура достигла значения выше температуры кипения алюминия, что соответствует образованию множественных пор. Однако математическое моделирование не позволяет достоверно оценить размеры сварного шва (длину и ширину), например, на рис. 5 заметно, что температурное поле, которому соответствует температура плавления, значительно превышает границы действительного сварного шва. Дефекты в виде пор расположены преимущественно в середине сварного шва вокруг кратера, их размеры 0,34—0,74 мм, причем поры имеют больший размер в глубине сварного шва. Трещины располагаются ближе к концу сварки, вокруг кратера находятся трещины размерами 0,63—2,48 мм. Так же с помощью палитры цветов на реконструкциях, полученных рентгеновским микротомографом, оценена плотность материала образца. Ближе к краям пластины плотность значительно возрастает, что соответствует 59,7884 и 74,2206 на разных палитрах, так же видно, что поверхность самого сварного шва имеет большую плотность по сравнению с поверхностью, на которой происходила сварка.

По итогам работы можно сделать вывод, что появление множественных дефектов сварного шва может быть объяснено тем, что процесс сварки происходил не по стандарту. Сравнение дефектов в начале и конце сварного шва позволяет выделить их особенности, так именно в конце сварного шва наблюдается характерный для таких температур плавления кратер. Сварочный процесс длился достаточно долго, так что пластина значительно нагрелась за счет теплопроводности и к концу сварки уже достигла высокой температуры, что и привело к образованию кратера, отходящих от него трещин и пор вдоль всего сварного шва. Тип дефектов и их распределение, а так же геометрические параметры сварного шва, соотносятся с литературными данными [2, 3, 14—23, 34]. Математическое моделирование позволяет установить температуры образования дефектов, однако геометрические характеристики сварного шва оценивать с его помощью является недопустимым. Данные, полученные с помощью математической модели, необходимо сравнивать с данными экспериментального образца. Более точная модель теплового процесса сварки может быть получена с помощью использования другой модели движущегося источника тепла, а именно модели Голдака.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00389, <https://rscf.ru/project/22-19-00389/>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейдари М.А., Пантелеенко А.Ф. Математическое моделирование сварочных деформаций в тонких пластинах // Наука и техника. 2011. № 5. С. 18—25.
2. Передельский В.А., Харченко В.Я., Черногоров А.Л., Тихонов С.В. О выявлении трещиноподобных дефектов сварки существующими методами контроля качества // Передовые инженерные исследования. 2021. Т. 21. №. 1. С. 89—95.

3. Муравьев С.В., Погадаева Е.Ю. Автоматизированное распознавание дефектов сварных соединений при визуальном контроле с использованием геометрических признаков // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 49—57.
4. Trieb K., Glinz J., Reiter M., Kastner J., Senck S. Non-destructive testing of ceramic knee implants using micro-computed tomography // The Journal of Arthroplasty. 2019. V. 34. № 9. С. 2111—2117.
5. Syryamkin V.I., Klestov S.A., Suntsov S.B. Digital X-ray Tomography / 2nd edition. London: Red Square Scientific, Ltd., 2020. 200 p. ISBN 978-0-9928299-9-5.
6. de Mendonça Filho F. F., Copuroglu O., Schlängen E., Šavija B. Determination of loss of reinforcement due to corrosion through X-ray computer micro-tomography // Materials. 2021. V. 14. No. 4. P. 893.
7. Сырякин В.И., Клестов С.А., Сунцов С.Б. Патент № 2745304 С1 Российская Федерация, МПК G01N 23/04. Способ рентгеновской томографии и устройство для его осуществления. № 2020133674. Заявл. 14.10.2020. Опубл. 23.03.2021. Заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».
8. Бехтин Ю.С., Клестов С.А., Куцов М.С., Сырякин В.И., Титов Д.В. Теоретические основы цифровой обработки изображений в встраиваемых системах технического зрения. Томск: STT, 2016. 406 с. ISBN 978-5-93629-577-5.
9. Hanke R., Fuchs T., Uhlmann N. X-ray based methods for non-destructive testing and material characterization // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2008. V. 591. No. 1. P. 14—18.
10. De Samber B., Renders J., Elberfeld T., Maris Y., Sanctorum J., Six N., Liang Z., De Beenhouwer J., Sijbers J. FleXCT: a flexible X-ray CT scanner with 10 degrees of freedom // Optics Express. 2021. V. 29. No. 3. P. 3438—3457.
11. Сырякин В.И. Цифровой рентгеновский 3D-микротомограф для диагностики материалов и элементов радиоэлектронной аппаратуры // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 29—38.
12. Shaloo M., Schnall M., Klein T., Huber N., Reitingner B. A. Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes // Materials. 2022. V. 15. No. 10. P. 3697.
13. Marusina M. Ya., Kaznacheeva A. O. Modern methods of tomography. Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics Press, 2006. 132 p.
14. Livieri P., Tovo R. Actual weld profile fatigue performance by digital prototyping of defected and undefected joints // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2022. V. 45. No. 11. P. 3436—3446.
15. Foorginejad A., Azargoman M., Mollayi N., Taheri M. Modeling of weld bead geometry using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in additive manufacturing // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2020. V. 6. No. 1. P. 160—170.
16. Bandi B., Dinda S. K., Kar J., Roy G. G., Srirangam P. Effect of weld parameters on porosity formation in electron beam welded Zircaloy-4 joints: X-ray tomography study // Vacuum. 2018. V. 158. P. 172—179.
17. Galos J., Ghaffari B., Hetrick E. T., Jones M. H., Benoit M. J., Wood T., Sanders P.G., Easton M. A., Mouritz A. P. Novel non-destructive technique for detecting the weld fusion zone using a filler wire of high x-ray contrast // NDT & E International. 2021. V. 124. P. 102537.
18. Han S. C., Park H. M., Uhm S. H., Choi D. Y., Jeong H. C., Kim Y. J., Jun T. S. Evaluation of liquid metal embrittlement crack in resistance spot welds under intensive welding condition using industrial X-ray computed tomography and machine learning // Welding in the World. 2021. V. 65. No. 10. P. 1887—1897.
19. Бвезупе А.С., Каонде Б.М. Дефекты сварных соединений / Международный студенческий строительный форум-2017. 2017. С. 32—38.
20. Стакян М.Г., Пирумян Н.В., Мартиросян А.В. Классификация повреждений и воздействующих факторов для разработки оптимальных расчетных схем сварных швов газопроводов // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2021. № 2. С. 52—62. DOI 10.53297/18293387-2021.2-52
21. Шнеерсон В.Я. Классификации периодических структур сварных швов, образованных при сварке металлов плавлением // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2020. С. 169—192.
22. Назаров Р.М., Гизатуллин З.М. Обзор методов анализа дефектов сварных швов на рентгенографических изображениях / Юность и знания-гарантия успеха-2020. 2020. С. 223—227.
23. Hesse A.C., Nitschke-Pagel T., Dilger K. On the effect of weld defects on the fatigue strength of beam welded butt joints // Procedia Structural Integrity. 2018. V. 13. P. 2053—2058.
24. Gosavi P.D., Sarkar K.K., Khunte S.K., Pawar V.R., Basu B. Microstructure and mechanical properties correlation of weld joints of a high strength naval grade steel // Procedia Structural Integrity. 2019. V. 14. P. 304—313.
25. Кархин В.А., Хомич П.Н., Иванов С.Ю. Модели источников теплоты для прогнозирования тепловых полей при сварке плавлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 4-1. С. 241—254.
26. Milyardi I., Baskoro A.S. Effect of current and speed on porosity in autogenous Tungsten Inert Gas (TIG) welding of aluminum alloys A1100 butt joint // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 348. No. 1. P. 012021.

27. Сливинский А.А., Препияло А.А., Бондаренко В.Л., Слюта В.П. Расчетно-экспериментальный анализ тепловых процессов сварки. 2014. № 1 (66). С. 76—83.
28. Matuszewski M. Modeling of 3D temperature field in butt welded joint of 6060 alloy sheets using the ANSYS program // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 659. No. 1. P. 012034.
29. Capriccioli A., Frosi P. Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation // Fusion engineering and Design. 2009. V. 84. No. 2-6. P. 546—553.
30. Samad Z., Nor N.M., Fauzi E.R.I. Thermo-Mechanical Simulation of Temperature Distribution and Prediction of Heat-Affected Zone Size in MIG Welding Process on Aluminium Alloy EN AW 6082-T6 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 530. No. 1. P. 012016.
31. Deng D., Murakawa H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint // Computational Materials Science. 2008. V. 43. No. 2. P. 353—365.
32. Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В. Повышение прочности сварных соединений при дуговой сварке // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2017. № 11. С. 34—37.
33. Bajpai T., Gupta P. K., Malik A. Thermomechanical Analysis of Pulsed Laser Welded Thin Aluminium Alloy Sheets // Optimization of Industrial Systems. 2022. P. 439—446.
34. Braun R., Donne C.D., Staniek G. Laser beam welding and friction stir welding of 6013-T6 aluminium alloy sheet // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Materials Science and Engineering Technology. 2000. T. 31. № 12. С. 1017—1026.
35. Goyal A., Kapoor H., Jayahari L., Saxena K. Experimental investigation to analyze the mechanical and microstructure properties of 310 SS performed by TIG welding // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. V. 2022.
36. Syryamkin V.I., Klestov S.A., Suntsov S.B. Desing of 3D X-ray Microtomograph Based on Its Digital Twin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 11. P. 1041—1049. [Сырямкин В.И., Клестов С.А., Сунцов С.Б. Проектирование рентгеновского 3D-микротомографа на основе его «цифрового двойника» // Дефектоскопия. 2022. № 11. С. 56—65.]
37. Martinussen M. Numerical modelling and model reduction of heat flow in robotic welding. Norwegian University of Science and Technology-Department of Engineering Cybernetics. Trondheim. Norway 11.3. Electronic sources Volvo Group.
38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618555. Российская Федерация. САПР 3D PMT. Программное обеспечение системы автоматизированного проектирования рентгеновских 3D микротомографов: № 2015615595: заявл. 25.06.2015: опубл. 12.08.2015 / С. С. Баус, В. И. Сырямкин, С. А. Клестов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».