

Технология и организация судостроения и судоремонта

Научная статья

УДК 621.791.14:62-97

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/73-82>

В.Н. Стаценко, Д.О. Вьюн, А.В. Кулик, К.А. Полуцкий

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, vladsta@mail.ru

ВЬЮН ДАНИЛ ОЛЕГОВИЧ – магистрант, viun.do@students.dvfu.ru

КУЛИК АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ – аспирант, kulik_av@dvfu.ru

ПОЛУЦКИЙ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – инженер, poluckii_ka@dvfu.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

**Верификация температурных полей
в процессе сварки трением с перемешиванием**

Аннотация. В процессе сварки трением с перемешиванием температурные поля в зоне соединения определяют физическую возможность пластического течения разогретого материала и получения качественного формирования структуры шва. В данной работе поставлена задача сопоставления расчетных и экспериментальных результатов исследования распределения температур в пластине из алюминиевого сплава АМг3 вокруг инструмента и под ним. Экспериментальные исследования проведены на лабораторном стенде, в котором на пластине из алюминиевого сплава АМг3 толщиной 4 мм закреплены 8 термопар, расположенных вдоль одной линии, находящейся в поперечном сечении относительно направления движения вращающегося инструмента. Инструмент для моделирования процесса сварки трением с перемешиванием и нагрева рабочей пластины имеет заплечик диаметром 22 мм. Для измерения сигналов от термопар используется аналогово-цифровой преобразователь «Термодат-22М5». По данным изменения температур от разных термопар по времени для заданной скорости перемещения инструмента определяются координаты нахождения разных изотерм и их геометрия. Расчетные исследования проведены по математической модели, основанной на схеме движущегося точечного источника в предельном состоянии, при этом инструмент представлен совокупностью элементарных источников нагрева, равномерно распределенных по его площади. Результаты исследований приведены в виде расчетных и экспериментальных полей температур пластины при скоростях вращения инструмента 90 рад/с и сварки 0,4 и 1,63 мм/с. Основным результатом проведенных исследований является то, что температура материала в зоне перемешивания составляет по расчету 500 °С, по эксперименту 510–520 °С. Наибольшее значение температуры наблюдается не в зоне перемешивания вокруг пина, а в области задней кромки инструмента. В результатах экспериментов асимметрия изотерм относительно линии сварки выражена значительно.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, температурные поля, эксперимент, расчет, скорость вращения, скорость сварки, диаметр рабочего инструмента, максимальная температура, асимметрия изотерм

Для цитирования: Стаценко В.Н., Вьюн Д.О., Кулик А.В., Полуцкий К.А. Верификация температурных полей в процессе сварки трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 73–82.

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) проводится вращающимся металлическим рабочим инструментом, который представляет собой стержень с буртом (заплечиком), из него выступает пин. При сварке заплечик инструмента разогревает металл за счет трения и защищает место сварки от воздействия окружающей среды. В результате нагрева и приложенного

© Стаценко В.Н., Вьюн Д.О., Кулик А.В., Полуцкий К.А., 2023

Статья поступила: 19.07.2023; рецензирование: 24.07.2023; одобрена для публикации: 20.12.2023.

давления металл переходит в пластифицированное состояние, и путем перемешивания этого металла за инструментом образуется сварной шов. В процессе СТП температура в зоне сварки и ее распределение по металлу существенным образом влияют на процессы массопереноса и фазовые превращения. Скорость диффузионных процессов, обеспечивающих надежное соединение свариваемых деталей, весьма значительно зависит от температуры.

Важнейшим методом исследования температурных полей является расчетный метод. Большой вклад в расчетное исследование тепловых процессов внесли Н.Н. Рыкалин [10], Е.А. Колубаев и др. [1]. Большинство работ, посвященных расчету распределения температуры в процессе СТП и её динамики, основано на решении уравнения теплопроводности [2, 5, 14]. В частности, моделируют трехмерное температурное поле образца с помощью нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности [4]. Зона максимальных температур располагается на поверхности заплечика в зоне его контакта с деталью.

В разработанной физико-математической модели СТП в виде системы уравнений теплопереноса, движения несжимаемой вязкой жидкости и неразрывности среды учтено объемное тепловыделение за счёт внутреннего трения в деформируемом металле [8, 9]. Численное решение системы уравнений для сварки листов толщиной 4 мм из алюминиевого сплава АА6013 позволило получить значения температур, которые составляют 0,8–0,9 от температуры плавления.

Экспериментальное измерение состояния температурного поля очень сложно, и связано это с техническими трудностями, так как зона нагрева при СТП закрыта вращающимся инструментом.

Для подтверждения расчетов была измерена температура алюминиевого сплава АД31Т [2]. Температуру измеряли хромель-алюмелевыми термопарами, их укладывали в стык на глубине 2 мм от поверхности, после чего обжимали свариваемыми деталями. Установлено, что температура на поверхности составляет 440 °С, а измеренная на глубине 2 мм от поверхности – 480 °С.

Температуру листов из алюминиевого сплава АМг5М толщиной 2,8 мм в различных зонах сварных соединений измеряли с помощью хромель-алюмелевых термопар [7]. Анализ полученных результатов показывает, что нагрев свариваемого материала до максимальных температур происходит вокруг основания пина инструмента, температура металла со стороны отхода инструмента всегда на 10–15 °С выше, чем со стороны его набегания.

Поля температур при сварке биметаллического образца из алюминиевого (АД31) и медного (М3) сплавов исследованы с использованием хромель-алюмелевых термопар и тензометрической станции А17-Т8 [8]. Термопары зачеканивались на поверхности медного образца на расстоянии 2,5, 7,5 и 15 мм от оси сварного шва. В этом случае необходимы поправки на теплопроводность при определении температур в зоне перемешивания. Сравнение экспериментальных данных с расчетными показывает заметное их расхождение.

В ходе обработки трением с перемешиванием поверхностных слоев деталей из магниевых и алюминиевых сплавов значения температур фиксировали с помощью инфракрасного тепловизора Fluke-ir25 [3]. Определено, что максимальная температура нагрева сплава в зоне взаимодействия инструмента с поверхностью сплавов достигала 340–380 °С.

При использовании двух термопар, закрепленных внутри рабочего вращающегося инструмента, установлено, что температура в области заплечиков ниже, чем температура в области пина [6]. С помощью конечно-элементного моделирования показано, что данный эффект связан с интенсивным отводом тепла в массивную хвостовую часть инструмента [15, 16]. Эти данные согласуются с результатами исследований [13, 14].

Математическое моделирование в сочетании с экспериментальными методами исследований позволяет получить максимально полную картину физико-механических процессов, протекающих при такой сварке. Однако результаты других расчётов различаются значительным разбросом значений температур нагрева в зоне сварки алюминиевых сплавов — от 340 до 660 °С [4, 7–9].

В настоящей работе предлагается провести сопоставление расчетных данных по температурным полям в области вокруг заплечика и под ним с экспериментальными результатами для различных значений скорости вращения инструмента и скорости его перемещения (сварки).

Техническое решение и методика расчетов

Математическая модель расчета полей температур в зоне нагрева при сварке трением с перемешиванием, разработанная нами, основана на схеме движущегося точечного источника в предельном состоянии [12]. При этом инструмент представлен совокупностью элементарных источников нагрева, равномерно распределенных по его площади, температурное поле рассчитывается как сумма температур от каждого элементарного (точечного) источника и производится по программе, разработанной в пакете Matlab.

Диаметр инструмента разбивается на ячейки, для каждой из них удельное тепловыделение определяется в зависимости от окружной скорости вращения инструмента V_i (м/с) и скорости сварки $V_{св}$ (мм/с) [13]:

$$q_i = k_1 V_i^2 + k_2 V_i + k_3, \text{ МВт/м}^2, \quad (1)$$

где коэффициенты

$$k_1 = -5,198 V_{св} - 0,97, \quad (2)$$

$$k_2 = 6,83 V_{св} + 3,36, \quad (3)$$

$$k_3 = 0,099 V_{св} - 0,0072. \quad (4)$$

Расчетные исследования по разработанной математической модели проведены для рабочей пластины из алюминиевого сплава АМг3 толщиной 4 мм.

Основные результаты этих исследований представлены в работах [11, 13]. По этим данным поля температур распределены неравномерно относительно центральной части инструмента, где происходят вращение пина и интенсивное перемешивание разогретых слоев свариваемых материалов. Изотермы вокруг инструмента образуют концентрические окружности, вытянутые в направлении, противоположном скорости сварки. На передней кромке инструмента температура пластины не превышает 300 °С, на задней кромке температура достигает 350–500 °С для разных режимов. Температура материала в зоне перемешивания (в области центра инструмента) составляет 330–460 °С для разных режимов, перепад температур на входе и выходе из этой зоны может составлять 50–140 °С.

Наибольшее значение температуры наблюдается не в зоне перемешивания вокруг пина, а в области задней кромки инструмента, при этом максимальное значение смещено относительно средней линии сварки в направлении, противоположном вращению инструмента. С увеличением скорости вращения инструмента максимальная температура повышается на 100–150 °С, а с увеличением скорости сварки понижается на 50–100 °С.

Необходимо экспериментальное подтверждение этих расчетных зависимостей.

Особенности проведения эксперимента

Экспериментальное измерение температуры в зоне нагрева и перемешивания связано с определенными трудностями, так как в этот момент инструмент вращается и закрывает зону нагрева плоской торцевой поверхностью заплечика.

Первоначально исследование температурных полей предполагалось с помощью инфракрасного пирометра Testan ТМ900 и тепловизионной камеры Nec tn9100wb (рис. 1). Однако данное оборудование позволяет определять значение температуры только в ограниченном количестве точек. Так, на экране тепловизионной камеры измерить температуру можно только в шести точках (рис. 1б). С помощью инфракрасного пирометра можно измерять температуру не в точке, а на определенной поверхности, площадь которой увеличивается с удалением от

измеряемой зоны. Существенным недостатком этих методов является невозможность измерять температуру материала под заплечиком сварочного инструмента.

В данном исследовании выбран контактный метод измерения температурных полей под вращающимся инструментом и в зоне вокруг него с помощью хромель-копелевых термопар.



Рис. 1. Измерение температурного поля с помощью инфракрасного пирометра Тестан ТМ900 (а) и тепловизионной камеры Nec tn9100wb (б)

Важной особенностью проведения эксперимента является то, что термопары зачеканивались не по всей поверхности пластины, а лишь вдоль одной линии, находящейся в поперечном сечении относительно направления движения вращающегося инструмента (направления сварки). Изотермы, получаемые от вращающегося инструмента при движении с заданной скоростью вдоль линии сварки, проходят через ряд термопар, при этом значения температур фиксируются с периодичностью по времени через 1 с. По заданной скорости перемещения инструмента и времени отсчета от его начального положения возможно определение координаты каждой точки изотерм относительно инструмента.

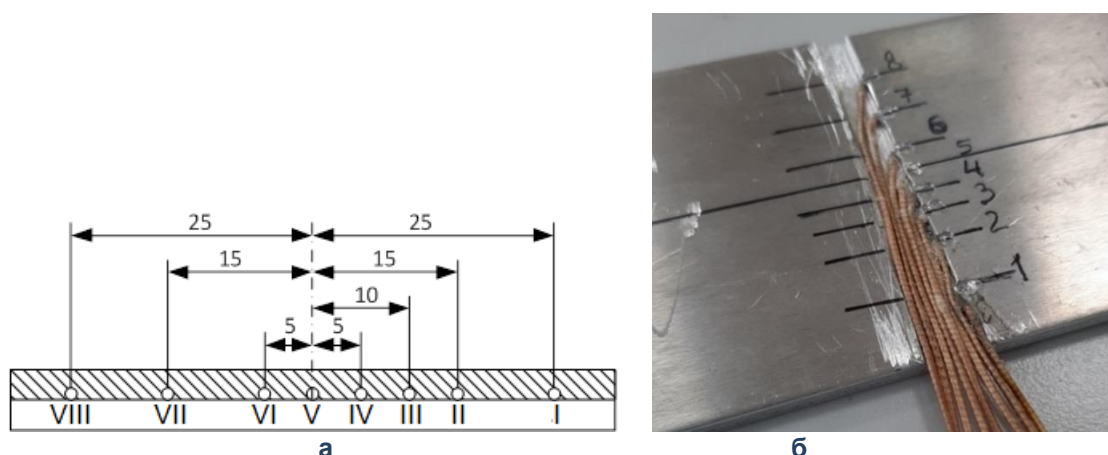


Рис. 2. Схема расположения термопар в поперечном сечении пластины (а), внешний вид зачеканенных термопар (б), I –VIII – номера термопар

Для экспериментального исследования выбрана пластина из алюминиевого сплава АМг3 размером 80×300 мм и толщиной 4 мм. В пластине для укладки термопар профрезерована канавка, в которой на расстоянии 5–10 мм друг от друга просверлены отверстия диаметром 1 мм на глубину не более 3 мм. В отверстия зачеканены хромель-копелевые термопары

с диаметром проволок 0,2 мм, общее количество термопар в одном ряду составляло 8 шт., количество рядов – 2 (рис. 2). От рабочей поверхности пластины термопары располагались на глубине не более 1,5 мм.

Рабочая пластина закрепляется на стальном листе через теплоизолирующую паронитовую прокладку толщиной 2 мм, лист прочно фиксируется на рабочем столе универсального вертикально-фрезерного станка FVV–125PD. Инструмент для моделирования процесса сварки трением с перемешиванием и нагрева рабочей пластины имеет заплечик диаметром 22 мм без пина, он устанавливается в шпиндель фрезерного станка под углом 2° от вертикали (рис. 3). Материал инструмента – сталь инструментальная быстрорежущая Р6М5.

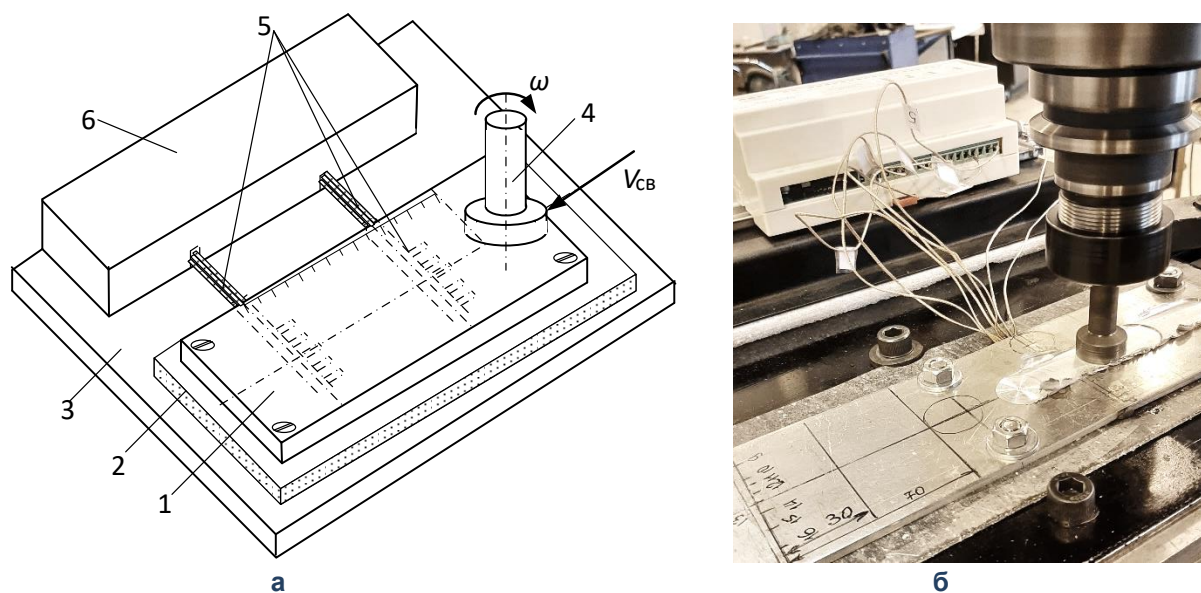


Рис. 3. Схема и внешний вид экспериментального стенда:
1 – алюминиевая пластина; 2 – паронитовая прокладка; 3 – стальной лист;
4 – инструмент; 5 – термопары; 6 – АЦП «Термодат-22М5»

Для измерения сигналов от термопар используется аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) «Термодат-22М5». Прибор имеет 24 входа, предназначенных для подключения термопар, снабжен интерфейсом RS485 для связи с компьютером с помощью протоколов Modbus ASCII или Modbus RTU. Значения температур и параметры прибора могут контролироваться и изменяться с компьютера.

В ходе эксперимента вращающийся сварочный инструмент внедряется в тело рабочей пластины на глубину 0,2 мм от ее поверхности на расстоянии 30–70 мм от линии термопар. После стабилизации температуры, фиксируемой термопарами, включается продольная подача рабочего стола фрезерного станка с заданной скоростью. При этом температуры фиксируются с периодичностью 1 с.

Методика обработки результатов

Результатом проведенных экспериментов является термический цикл, описывающий изменение температуры по времени с каждой термопары. При продольном перемещении сварочного инструмента изотермические линии движутся вдоль линии сварки проходя вместе с инструментом ряд термопар. Термопары фиксируют температуру и с помощью программы TermodatNet выполняется построение температурного графика по времени (рис. 4).

Получение из этого графика полей изотерм производится в следующем порядке. На шкале температур в диапазоне от 360 до 500 °С с шагом в 20 °С проводятся горизонтальные линии, в точках пересечения с изотермами выполняется отсчет времени. Для заданной скорости перемещения инструмента возможно определение координат изотермы и ее геометрии. По значениям от восьми термопар можно получить изотермические линии по шестнадцати

точкам. Для автоматизации построения графиков была подготовлена программа, позволяющая определять точки пересечения с высокой точностью.

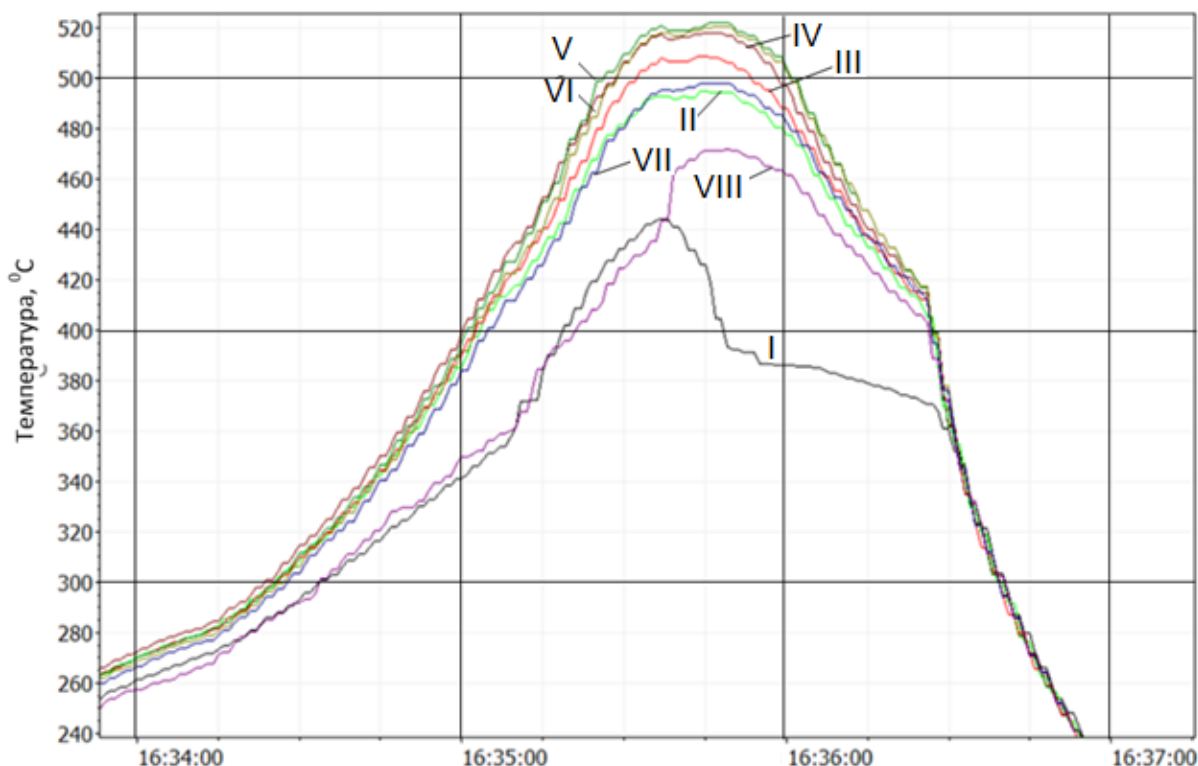


Рис. 4. Изменение температур термопар по времени ($V_{CB} = 0,4 \text{ мм/с}$; $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$), I–VIII – номера термопар

В целях сопоставления с экспериментальными данными был произведен расчет полей температур для режима, соответствующего скорости вращения инструмента $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$ и скорости перемещения инструмента (скорости сварки) $V_{CB} = 0,4 \text{ мм/с}$ (рис. 5). Расчет произведен по усовершенствованной модели [12]. В этом варианте учтены изменения значений теплопроводности, удельной теплоёмкости и плотности алюминиевого сплава АМГ3 с изменением температуры, введена поправка на тепловыделения при высоких скоростях перемещения инструмента.

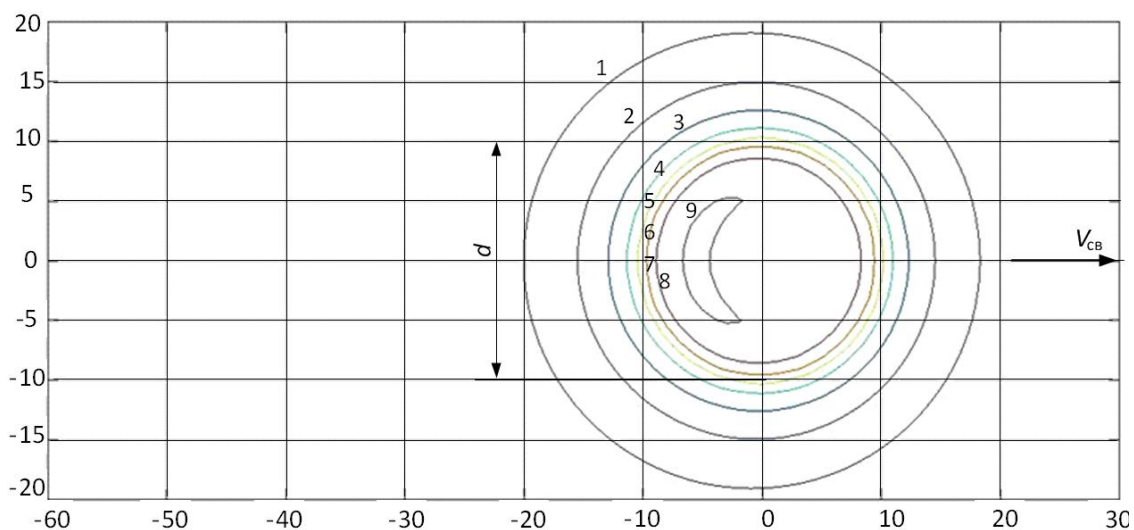


Рис. 5. Расчетные поля изотерм на поверхности пластины при $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$, $V_{CB} = 0,4 \text{ мм/с}$:
 1 – $t = 150 \text{ °C}$; 2 – 200 °C ; 3 – 250 °C ; 5 – 300 °C ; 6 – 350 °C ;
 7 – 400 °C ; 8 – 450 °C ; 9 – 500 °C

Сравнение результатов расчета поля изотерм на поверхности пластины при $V_{св} = 0,4 \text{ мм/с}$ и $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$ (рис. 5) и экспериментальных данных (рис. 6) показывает следующее.

1. Поля температур распределены неравномерно относительно центральной части инструмента, где происходит вращение пина и интенсивное перемешивание разогретых слоев свариваемых материалов. Изотермы вокруг инструмента образуют концентрические окружности, незначительно вытянутые в направлении, противоположном направлению сварки. Это незначительное смещение объясняется низкой скоростью сварки, при повышении этой скорости смещение изотерм увеличивается (см. рис. 6).

2. На передней кромке инструмента температура пластины по расчету не превышает $300 \text{ }^\circ\text{C}$, по эксперименту – $460 \text{ }^\circ\text{C}$. На задней кромке температура по расчету достигает $350 \text{ }^\circ\text{C}$, по эксперименту – $480 \text{ }^\circ\text{C}$, перепад температур на входе и выходе из этой зоны может составлять $20\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Температура материала в зоне перемешивания (в области центра инструмента) составляет по расчету $500 \text{ }^\circ\text{C}$, по эксперименту $510\text{--}520 \text{ }^\circ\text{C}$. Наибольшее значение температуры наблюдается не в зоне перемешивания вокруг пина, а в области задней кромки инструмента.

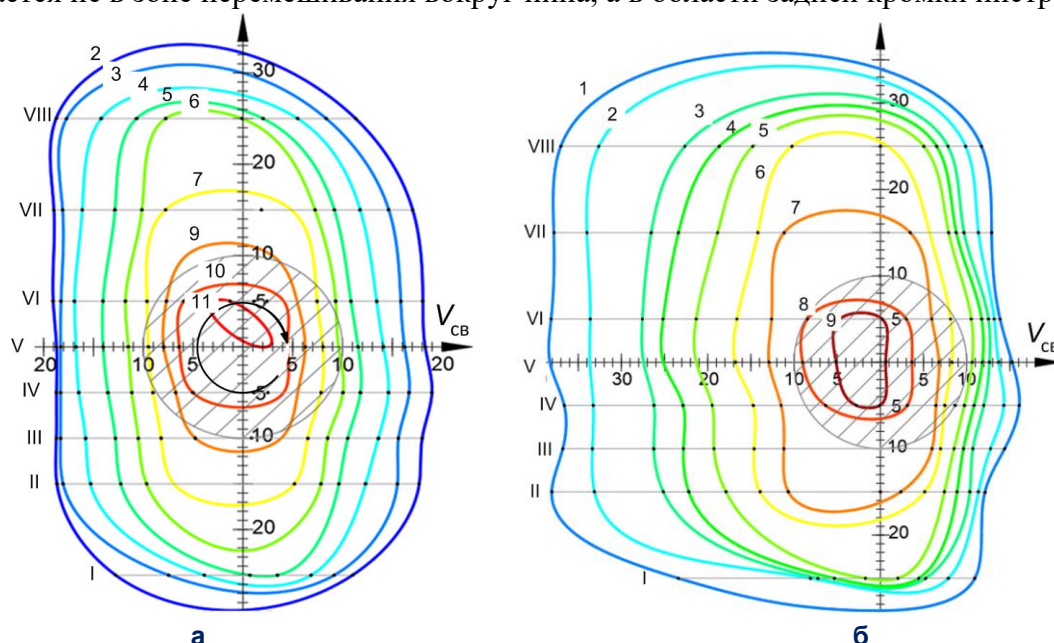


Рис. 6. Экспериментальные поля изотерм на поверхности пластины

при $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$, $V_{св} = 0,4 \text{ мм/с}$ (а) и $1,63 \text{ мм/с}$ (б):

**1 – $t = 360 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $380 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $400 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $420 \text{ }^\circ\text{C}$; 5 – $440 \text{ }^\circ\text{C}$; 6 – $460 \text{ }^\circ\text{C}$; 7 – $480 \text{ }^\circ\text{C}$;
8 – $490 \text{ }^\circ\text{C}$; 9 – $500 \text{ }^\circ\text{C}$; 10 – $510 \text{ }^\circ\text{C}$; 11 – $520 \text{ }^\circ\text{C}$; I–VIII – номера термопар**

4. В результатах расчетов асимметрия температурных полей относительно линии сварки выражена слабо, в результатах экспериментов асимметрия выражена значительно. Так, изотерма с температурой $510 \text{ }^\circ\text{C}$ смещена относительно линии сварки незначительно, а изотерма с температурой $520 \text{ }^\circ\text{C}$ находится полностью с одной стороны этой линии. Максимальное значение температуры смещено относительно средней линии сварки в направлении, противоположном вращению инструмента (см. рис. 6). Такое смещение температуры (асимметрия) объясняется взаимным влиянием относительной скорости вращения и перемещения (сварки). При противоположных направлениях векторов относительная скорость увеличивается, соответственно повышается тепловыделение, зона максимальной температуры смещается в этом направлении. В экспериментах при вращении инструмента по часовой стрелке (см. рис. 6а) и в указанном направлении сварки $V_{св}$ относительная скорость выше в верхней части пластины над линией сварки, соответственно в этой области происходят большее тепловыделение и смещение изотерм в этом направлении. Эти результаты подтверждают наши предыдущие расчетные данные [12].

5. Асимметрия изотерм относительно средней линии сварки больше проявляется на малых радиусах инструмента, где его окружные скорости относительно невелики и соизмеримы со скоростью сварки, асимметрия увеличивается с уменьшением скорости вращения и увеличением скорости сварки [12].

Заключение

Полученные расчетные и экспериментальные значения температурных полей практически совпадают со значениями температур под инструментом и на его границе. Экспериментально подтвержден важный результат: наибольшее значение температуры наблюдается не в зоне перемешивания вокруг пина, а в области задней кромки инструмента, где перемешивание материала в процессе сварки уже закончилось. При согласовании расчетных и экспериментальных результатов можно установить адекватность разработанной модели.

Более правильная форма расчетных значений изотерм объясняется условием расчета как для бесконечной пластины, в эксперименте использовалась пластина конечных размеров.

Полученные результаты расчета и измерения температурного поля в свариваемых деталях дают возможность оперативно прогнозировать степень нагрева и его состояние в зонах исследуемой области. Кроме того, они позволяют получить представление об изменении температур в процессе сварки в тех зонах исследуемой области, где очень сложно или невозможно измерить температуру. Особую важность эти данные при разработке конструкции, геометрии и технологических схем сварочного инструмента.

Вклад авторов в статью: В.Н. Стаценко – постановка задач исследования, обработка результатов экспериментов, оформление статьи; Д.О. Вьюн – анализ литературных источников, проведение и обработка результатов экспериментов; А.В. Кулик, К.А. Полуцкий – проведение экспериментов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11292> (дата обращения: 30.09.2023).
2. Котлышев Р.Р., Шучев К.Г., Крамской А.В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2010. Т. 10, № 5(48). С. 693–699. EDN: NBYPVZ
3. Майстренко А.Л., Лукаш В.А., Заболотный С.Д., Страшко Р.В. Применение процесса трения с перемешиванием для соединения магниевых сплавов и модификации их структуры // *Автоматическая сварка*. 2016. № 5–6(753). С. 74–81.
4. Майстренко А.Л., Нестеренков В.М., Дутка В.А., Лукаш В.А., Заболотный С.Д., Ткач В.Н. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием // *Автоматическая сварка*. 2015. № 1(739). С. 5–14. EDN: TGNCPT
5. Медведев А.Ю., Павлинич С.П., Атрощенко В.В., Маркелова Н.И. Моделирование температурного поля при линейной сварке трением // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2010. Т. 14, № 2(37). С. 75–79. EDN: OHMOLG
6. Миронов С.Ю. О поле температур внутри рабочего инструмента, генерируемом в ходе сварки трением с перемешиванием // *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25, № 5. С. 40–45. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_5_40
7. Покляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием // *Автоматическая сварка*. 2011. № 8. С. 48–51. EDN: THGBFL
8. Рзаев Р.А., Джалмухамбетов А.У., Смирнов В.В., Атуев Ш.М. Динамика температурного поля и оценка технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических пластин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18, № 1-2. С. 274–278. EDN: WLWZCH

9. Рзаев Р.А., Чуларис А.А., Джалмухамбетов А.У., Атуев Ш.М. Динамическая модель распределения температуры в металле при сварке трением с перемешиванием // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 3. С. 47–55. EDN: VPLHMX
10. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
11. Стаценко В.Н. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 120 с.
12. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Суханов М.А. Моделирование температурных полей в процессе сварки трением с перемешиванием // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2021. № 3(48). С. 66–73. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-8>
13. Стаценко В.Н., Сухорада А.Е. Обобщение распределения тепловыделений в процессе сварки трением с перемешиванием // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2021. № 2(47). С. 21–28. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-3>
14. Grujić M., Arakere G., Yalavarthy H.V., He T., Yen C.F., Cheeseman B.A. Modeling of AA5083 Material-Microstructure Evolution During Butt Friction-Stir Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(5):672–684. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9536-1>
15. Heidarzadeh A., Mironov S., Kuibyshev R., Cam G., Simar A., Gerlich A., Khodahakhshi F., Mostafaei A., Field D.P., Robson J.D., Deschamps A., Withers P.J. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2021;117:100752. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
16. Yi D., Onuma T., Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Evaluation of heat input during friction stir welding of aluminum alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016;22(1):41–46. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1183079>

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 4/57

Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding productionwww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/73-82>

Statsenko V., Vyun D., Kulik A., Polutsky K.

VLADIMIR N. STATSENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor, vladsta@mail.ruDANIL O. VYUN, Master's Student, viun.do@students.dvfu.ruALEXANDER V. KULIK, Postgraduate Student, kulik_av@dvfu.ruKONSTANTIN A. POLUTSKY, Engineer, poluckii_ka@dvfu.ru*Far Eastern Federal University*

Vladivostok, Russia

Verification of temperature fields during friction stir welding

Abstract. In the process of friction stir welding, the temperature fields in the joint zone determine the physical possibility of plastic flow of the heated material and obtaining a high-quality formation of the weld structure. In this paper, we set the task of comparing the calculated and experimental results of studying the temperature distribution in a plate made of AMg3 aluminum alloy around and under the tool.

Experimental studies were carried out on a laboratory bench, in which 8 thermocouples are fixed on a AMg3 aluminum alloy plate 4 mm thick, located along one line, located in a cross section relative to the direction of movement of a rotating tool. The tool for simulating the process of friction stir welding and heating of the working plate has a shoulder with a diameter of 22 mm.

To measure signals from thermocouples, an analog-to-digital converter "Termodat-22M5" is used. According to the temperature changes from different thermocouples over time for a given tool travel speed, the coordinates of the location of different isotherms and their geometry are determined.

Computational studies were carried out according to a mathematical model based on the scheme of a moving point source in the limiting state, while the tool is represented by a set of elementary heating sources uniformly distributed over its area.

The research results are presented in the form of calculated and experimental temperature fields of the plate at tool rotation speeds of 90 rad/s and welding speeds of 0,4 and 1,63 mm/s. The main result of the research is that the temperature of the material in the mixing zone is 500 °C according to the calculation, 510–520 °C according to the experiment. The highest temperature value is observed not in the mixing zone around the pin,

but in the region of the trailing edge of the tool. In the experimental results, the asymmetry of the isotherms with respect to the welding line is significantly pronounced.

Keywords: friction stir welding, temperature fields, experiment, calculation, rotation speed, welding speed, working tool diameter, maximum temperature, asymmetry of isotherms

For citation: Statsenko V., Vyun D., Kulik A., Polutsky K. Verification of temperature fields during friction stir welding. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(4):73–82. (In Russ.).

Contribution of the authors: V.N. Statsenko – formulation of research problems, processing of experimental results, preparation of the article; D.O. Vyun – analysis of literary sources, conducting and processing the results of experiments; A.V. Kulik, K.A. Polutsky – conducting experiments. The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Kolubaev E.A. Features of the formation of the structure of a welded joint obtained by friction stir welding. *Modern problems of science and education*. 2013. Vol. 60. (In Russ.). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11292> – 30.09.2021.
2. Kotlyshev R.R., Shuchev K.G., Kramskoy A.V. Temperature calculations in friction stir welding with aluminium alloys. *Advanced Engineering Research*. 2010;10(5):693–699. (In Russ.).
3. Maistrenko A.L., Lukash V.A., Zabolotny S.D., Strashko R.V. Application of the process of friction with stirring for joining magnesium alloys and modifying their structure. *Automatic welding*. 2016;(5-6):74–81. (In Russ.).
4. Maistrenko A.L., Nesterenkov V.M., Dutka V.A., Lukash V.A., Zabolotny S.D., Weaver V.N. Modeling of thermal processes to improve the structure of metals and alloys by friction with mixing. *Automatic welding*. 2015;(1):5–14. (In Russ.).
5. Medvedev A.Yu., Pavlinich S.P., Atroshchenko V.V., Markelova N.I. Modeling of the temperature field at linear welding by the friction. *Vestnik UGATU*. 2010;14(2):75–79. (In Russ.).
6. Mironov S.Yu. Temperature distribution within the friction stir welding tool. *Fizicheskaya mezhmekhanika*. 2022;25(5):40–45. (In Russ.). https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_5_40
7. Poklyatsky A.G. Features of the temperature distribution in thin-sheet aluminum alloy AMg5M during friction stir welding. *Automatic welding*. 2011;(8):48–51. (In Russ.).
8. Rzaev R.A., Dzhalukhambetov A.U., Smirnov V.V., Atuev Sh.M. The temperature field dynamics and estimation of technological parameters at welding by friction with hashing of bimetallic plates. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(1-2):274–278. (In Russ.).
9. Rzaev R.A., Chularis A.A., Dzhalukhambetov A.U., Atuev SH.M. A dynamic model of the temperature distribution in the metal during friction stir welding. *Fundamental research*. 2016;(3):47–55. (In Russ.).
10. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes in welding. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p. (In Russ.).
11. Statsenko V.N. Thermal processes in friction stir welding. Vladivostok, Publishing House of FEFU, 2021. 120 p. (In Russ.).
12. Statsenko V.N., Negoda E.N., Sukhanov M.A. Modeling temperature fields during friction stir welding. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(3):66–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-8>
13. Statsenko V.N., Sukhorada A.E. Generalization of the distribution of heat release during friction stir welding. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(2):21–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-3>
14. Grujicic M., Arakere G., Yalavarthy H.V., He T., Yen C.F., Cheeseman B.A. Modeling of AA5083 Material-Microstructure Evolution During Butt Friction-Stir Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(5):672–684. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9536-1>
15. Heidarzadeh A., Mironov S., Kuibyshev R., Cam G., Simar A., Gerlich A., Khodahakhshi F., Mostafaei A., Field D.P., Robson J.D., Deschamps A., Withers P.J. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2021;117:100752. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
16. Yi D., Onuma T., Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Evaluation of heat input during friction stir welding of aluminum alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016;22(1):41–46. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1183079>