

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ТОНКОЛИСТОВОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Р.А. Кректулева, Ю.Н. Сараев, В.М. Семенчук, Р.О. Черепанов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, РФ

Проведено численное моделирование тепловых процессов при формировании сварочной ванны в низколегированной стали под воздействием электрической дуги. Рассмотрены различные режимы горения дуги. Обнаружено качественное различие в распространении и диссипации тепловой энергии в зависимости от режимов. Исследованы механизмы самоорганизации тепловых структур, обусловленные сильно нелинейными теплофизическими свойствами низколегированной стали, режимами подачи в сварочную ванну тепловой энергии и особенностями ее диссипации на границах. Достоверность численной модели подтверждена экспериментально, что позволяет результаты компьютерных исследований рекомендовать для практического применения. Библиогр. 14, рис. 7.

Ключевые слова: сварной шов, зона контакта, тепловой поток, нелинейность теплофизических свойств, синергетика, самоорганизация, внутренняя структура

Тонколистовые низколегированные стали (толщиной до 3,5...4,0 мм), широко применяемые во многих отраслях промышленности, в соответствии с ГОСТ 14771-76 рекомендуется варить с использованием так называемых подкладок, которые крепятся в нижнем положении формирующегося сварного соединения. Роль подкладок — удерживать расплавленный металл от вытекания из сварочной ванны. В технической литературе закрепилось представление о том, что применение медных (реже алюминиевых) подкладок способствует отведению излишка теплоты за счет более интенсивной диссипации тепловой энергии, поэтому они получили название теплоотводящих или формирующих подкладок, влияющих не только на формирование металла шва, но и на его структуру непосредственно в зоне неразъемного соединения [1–3]. Идея применения медных подкладок по внешним признакам хорошо согласуется с теорией самоорганизации нелинейных систем, развиваемой школой лауреата Нобелевской премии по химии 1977 г. И.Р. Пригожина [4]. Общие представления о формировании сварного соединения с позиций самоорганизующихся систем изложены в работе [5]. В настоящее время отмеченное утверждение находит широкое применение при создании различных систем автоматического регулирования процессами сварки и наплавки [6–8].

Термин «самоорганизация» в современном научном языке означает процесс пространственно-временной структурной перестройки системы, в результате чего система приобретает новые качества, как правило, улучшающие ее функционирование в старых условиях. Возможны три сценария развития самоорганизации: порядок на основе порядка, порядок на основе хаоса и хаос на основе

порядка, его еще называют динамическим хаосом. В приложении к технологиям сварки самоорганизующейся системой является само сварное соединение, которое сформировано не хаотично (расплав–кристаллизация при любых режимах), а с учетом физической природы металла и строгим соблюдением баланса между притоком энергии в сварочную ванну и ее оттоком. Важность данного параметра показана в работе [9], где установлено, что скорость изменения температуры расплавленного металла оказывает доминирующее влияние на характер структурно-фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния. Правильное применение данной теории к сварочным технологиям позволило бы снять многие проблемы надежности сварных соединений, особенно их работы в критических условиях: высоких и низких температур, повышенного давления и других. Тем не менее, до сих пор в большинстве технологий остаются открытыми не только вопросы обнаружения механизмов, которые бы приводили технологическую систему в порядок, но и вопросы, связанные со способами исключения навязанного ей поведения, не свойственного принципам рационального функционирования.

Цель настоящей работы — разработать методику численного анализа механизмов самоорганизации тепловых процессов в сварочной ванне при электродуговой сварке тонколистовой низколегированной стали, экспериментально доказать ее достоверность на примере сварки стали Ст3 с использованием медных теплоотводящих подкладок.

Физическая и математическая постановки задачи. Формулирование исследовательских задач вытекает из рассмотрения особенностей тех-

нологии электродуговой сварки неплавящимся электродом в среде аргона. В зоне сварочной ванны вещество находится во всех четырех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном, плазменном. Одновременно с этим происходят различные превращения энергии: электромагнитные, тепловые, химические, механические, радиационные и внутриатомные. Особенность данного способа сварки заключается в том, что примерно 93...95 % энергии электрической дуги расходуется на процессы тепломассопереноса.

Схематично процесс сварки представлен на рис. 1. Свариваемые образцы одинаковых размеров размещают на медной подкладке. Электрод перемещается вдоль свариваемого стыка со скоростью v (указано стрелкой). Исследования проводили для стальных образцов длиной 60 и 120 мм, шириной 20 и 40 мм, соответственно, толщина варьировалась от 1,2 до 3,5 мм. Размеры медных подкладок по длине были такими же, как и стальные образцы или на 2 мм длиннее, толщины варьировались от 1 до 3 мм с шагом 0,5 мм. Ширину зазора между медными подкладками задавали: 0, 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 и 10,0 мм. Для проведения натурных экспериментов использовали установку на подвижной платформе. Горелку с электродом крепили в специальном держателе, имеющем функцию регулирования вылета. В момент зажигания дуги платформа приходила в движение. В конструкцию установки заложено управление длиной межэлектродного промежутка, вольт-амперными характеристиками источника питания и скоростью перемещения свариваемого образца.

На рис. 1 плоскости А, В и С, пересекающие образец перпендикулярно плоскости движения

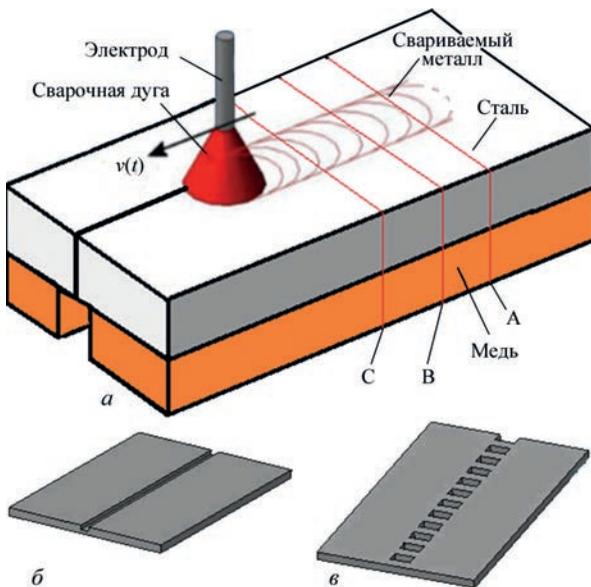


Рис. 1. Эскизное изображение сварки двух стальных пластин на медной теплоотводящей подкладке: а — с зазором; б — с канавкой; в — с перфорацией

электрода, выделены с целью дальнейших теоретических и экспериментальных исследований структурно-фазовых изменений получаемого сварного соединения и проверки адекватности модельных представлений.

Основы построения математической модели технологических процессов сварочного производства, включающей уравнения баланса, уравнение фазовых переходов и уравнение кинетики химических превращений, изложены в работе [10]. В соответствии с этой работой исходная система уравнений, моделирующая ТIG-сварку, имеет следующий вид:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right); \quad (1)$$

$$L_k V_k = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n_{+0}} - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial n_{-0}}; \quad (2)$$

$$q(r) = \frac{\eta I(t)U(t)k}{\pi e^{kr^2}}. \quad (3)$$

В представленной системе уравнение (1) — пространственное динамическое уравнение теплопроводности, (2) — уравнение фазовых превращений, (3) — распределение плотности потока энергии плазменной дуги в зоне действия источника.

Система уравнений (1)–(3) дополнена начальными условиями

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (4)$$

Граничные условия заданы в виде:

– вне области действия источника

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T_0^4 - T^4); \quad (5)$$

– в области действия источника

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\eta I U k}{\pi} \exp(-kr^2); \quad (6)$$

– в области контакта двух разнородных материалов

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial n}, \quad x, y, z \in S_{12}. \quad (7)$$

В системе уравнений (1)–(7) использованы следующие обозначения: T — температура; $\rho(T)$ — зависимость плотности от температуры; $C_p(T)$ — зависимость теплоемкости от температуры; t — время; x, y, z — пространственные координаты; $\lambda(T)$ — зависимость коэффициента теплопроводности от температуры; L_k — теплота фазового перехода (в том числе, плавление, испарение, кристаллизация); V_k — скорость движения

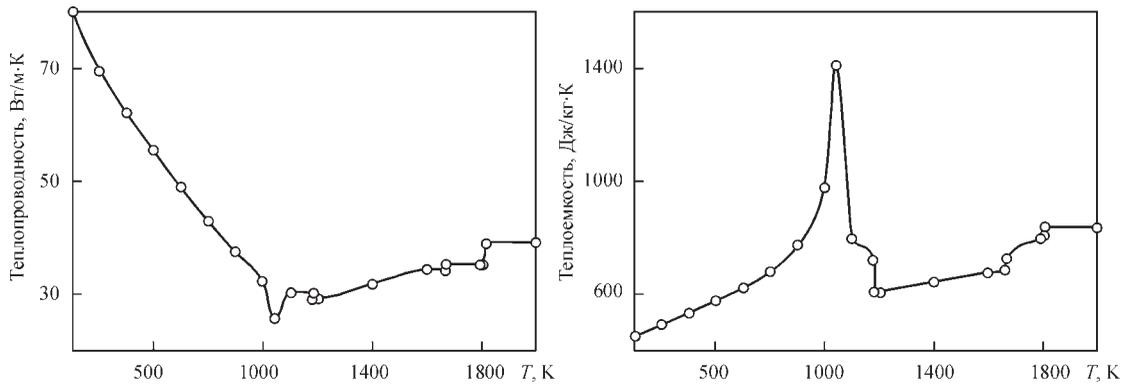


Рис. 2. Теплофизические свойства железа (и низколегированной стали)

фронта фазового перехода; n — вектор нормали к границе раздела фаз (индексы внизу \pm указывают на разные стороны от границы раздела); λ_s, λ_l — коэффициенты теплопроводности материала по разные стороны границы фазового перехода (в частности, твердой и жидкой фаз); r — радиус теплового пятна от горячей дуги; η и $k(L)$ — полуэмпирические параметры, характеризующиеся мощностью источника нагрева и ее распределение по тепловому пятну; L — длина межэлектродного промежутка; I — ток, U — напряжение электродугового источника; ε — степень черноты тела; $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана–Больцмана; α — коэффициент теплообмена с окружающей средой; λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности контактирующих материалов; S_{12} — площадь контакта разнородных материалов. Горящая дуга движется по траектории, определяемой системой уравнений:

$$\begin{cases} x = x_0 + V_x t, \\ y = y_0, \end{cases} \quad (8)$$

где x_0, y_0 — координаты начальной точки; V_x — скорость движения источника вдоль оси.

Математическая модель (1)–(8) дополнена экспериментальными зависимостями [11] теплофизических характеристик низколегированной стали (рис. 2) и диаграммой состояния «железо–углерод» [12]. Зная детальное распределение температуры в объеме свариваемых образцов, по диаграмме состояния в них можно установить растворимость углерода в соответствующих областях, что позволяет неявно учесть диффузионные процессы и определить области структурно-фазовых превращений (плавления, неполного расплавления, перегрева, нормализации и т.д.) в зоне сварного шва.

Поставленную задачу решали численно методом конечных разностей [13]. Шаг сетки в различных численных экспериментах варьировали от 0,2 до 0,5 мм, в зависимости от целей исследова-

ния. Предварительными расчетами было установлено, что при правильно выбранных режимах горения дуги тепловая энергия от источника локализуется в узкой полосе вдоль траектории движения дуги. Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности в рассматриваемых сталях в диапазоне температур 1000...1300 К имеет глубокий минимум, т. е. скорость передачи теплоты за границы этого диапазона незначительна, поэтому целесообразно ограничиться исследованием узких полосок шириной не более 20 мм. Также было установлено, что температурное поле стабилизируется по длине на расстоянии 6 мм от начала сварного соединения для образцов толщиной 1,2 мм. С ростом толщины это расстояние постепенно увеличивается до 20 мм для пластин 3,5 мм. Для дальнейшего исследования рассмотрены свариваемые стальные пластины ограничили размерами 60×20×2 мм каждая.

Ниже приведены результаты, показывающие, что рассматриваемая расчетная модель позволяет с хорошей точностью определить в объеме не только размеры сварного шва, но и все зоны структурно-фазовых переходов в результате многократных термических циклов «нагрев-охлаждение».

Результаты компьютерных экспериментов по сварке стальных пластин движущейся электрической дугой. Следует отметить, что рассмотренная выше математическая постановка задачи и современный уровень компьютерной техники позволяют достаточно точно (в пределах ошибки опыта 5...7 %) предсказать режимы горения дуги, которые бы обеспечили требуемые характеристики сварного шва и ЗТВ, но, кроме того, дополнительно извлечь еще большой объем информации, которую невозможно получить в прямых экспериментах. Применение приемов цифровой визуализации позволило детально проследить все стадии формирования сварного соединения: нагрев, плавление, испарение, охлаждение, конденсацию, кристаллизацию, фазовые переходы и сопутствующие им термомеханические изменения [13].

С этой целью использовали системный подход, разработанный в работе [10]. Было выделено 6 основных структурных уровней, по которым вели исследование:

- оценка влияния мощности источника нагрева на распределение плотности теплового потока в факеле горячей дуги;
- анализ процессов распределения тепловой энергии в свариваемых и теплоотводящих материалах;
- определение всех входных параметров системы, в той или иной степени влияющих на конечные свойства сварного соединения;
- оценка внутренней структуры материала сварного соединения по результатам компьютерного моделирования;
- управление процессами диффузии и структурообразования на стадии проектирования технологического процесса;

– определение критериев рациональной самоорганизации тепловых процессов в сварном соединении.

Первоначально рассмотрели пример сварки пластин на подкладке без зазора. Численно установили режимы горения дуги, обеспечивающие проплавление пластин толщиной 2 мм на всю глубину. На рис. 3 представлены температурные поля в два момента времени в двух областях: на поверхности сварочной ванны и в зоне контакта свариваемых пластин со сплошной медной подкладкой. На градуировочной температурной шкале верхнее значение указывает максимальную температуру в образце в данный момент времени, черта указывает на температуру в зоне контакта двух материалов. Из рисунков видно, что по мере движения источника нагрева максимальные температуры в зоне контакта дуги со стальной поверхностью (толщина слоя около 0,2 мм) растут: в начале процесса сварки температура $T = 3439$ К, а к середине образца $T = 3611$ К. Это существенно выше

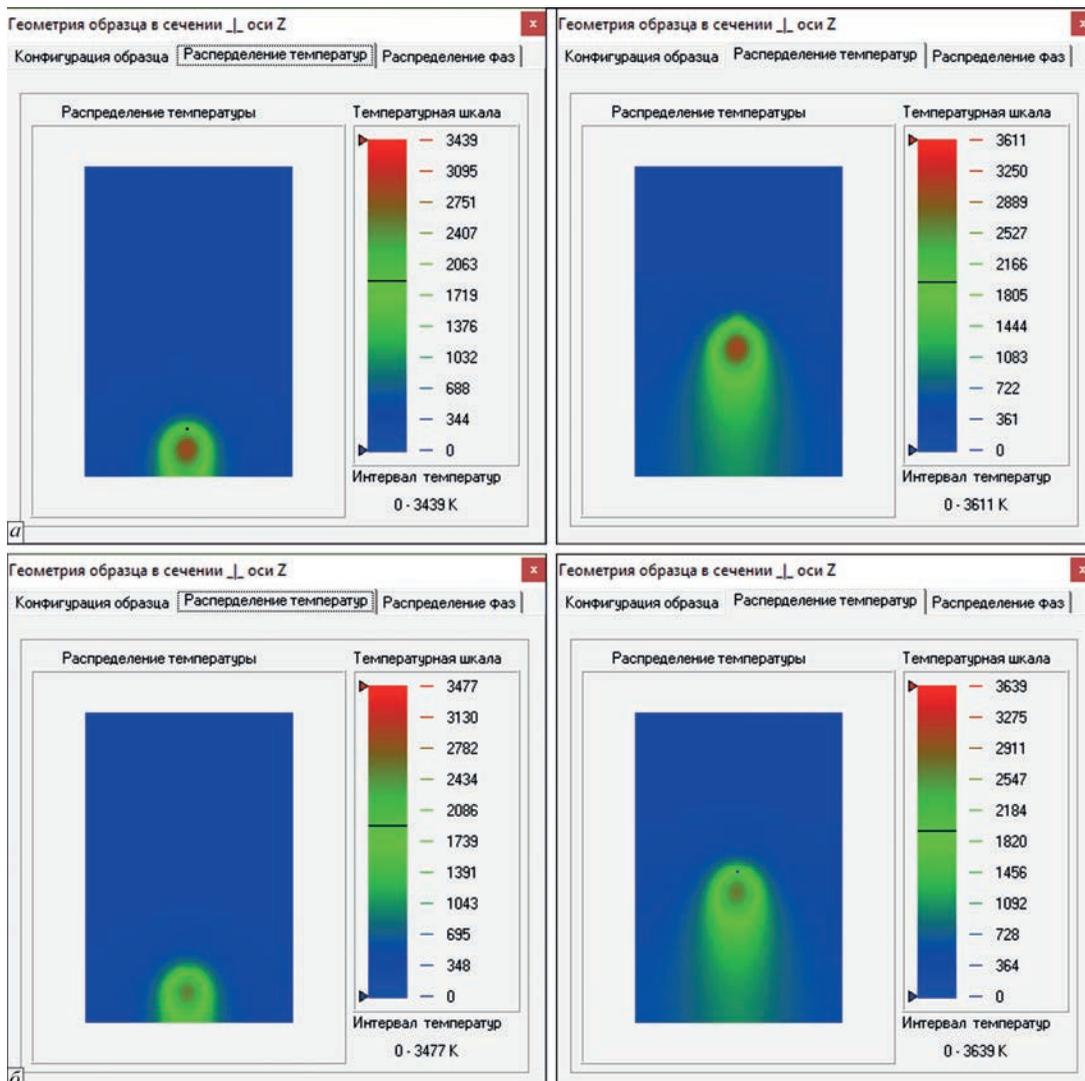


Рис. 3. Формирование температурных полей в разные моменты времени: *a* — на поверхности сварочной ванны; *b* — то же в зоне контакта свариваемых образцов с медной подкладкой

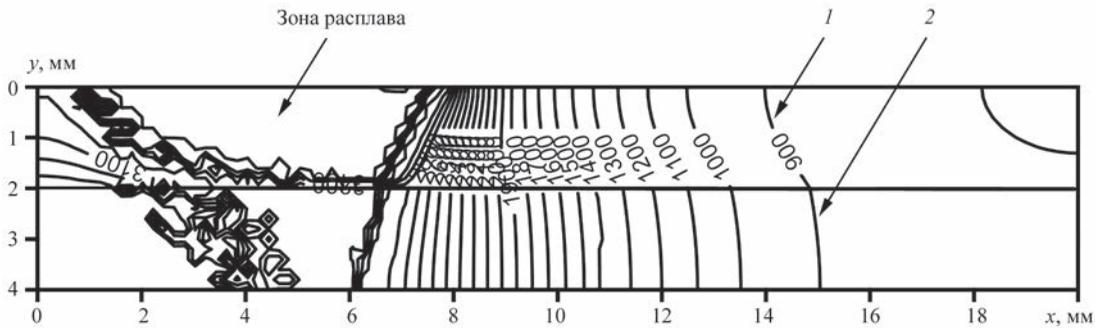


Рис. 4. Карта изолиний температур в осевом сечении сварочной ванны на 2-й секунде от начала сварки: 1 — стальной стык; 2 — медная подкладка

температуры плавления стали ($T = 1850 \text{ K}$), в то время как в зоне контакта с медной подкладкой температура близка к температуре плавления стали. При выбранных режимах сварки наблюдается явный перегрев поверхности сварочной ванны. Снижение мощности ведет к неполному проплавлению. Причиной перегрева оказалась сама «теплоотводящая» подкладка. Это было установлено, исходя из анализа распространения изолиний температур в осевом сечении образца (рис. 4). Из рисунка видно, что благодаря высокой теплопроводности меди тепловой фронт в ней распространяется быстрее, чем в стали. За счет этого часть отведенной (диссипированной) из ванны энергии все время возвращается из подкладок назад в свариваемое изделие, подогревая его снизу. По наклону изолиний также можно сказать, что вначале они идут почти параллельно стенкам сварочной ванны под острым углом к зоне контакта. А затем в стальном образце постепенно изолинии меняют угол наклона на тупой. Низ ванны на удалении от источника нагрева становится более прогретым, чем верх.

Из этого примера видно, что основные требования теории самоорганизации И.Р. Пригожина для процесса сварки выполнены. Нелинейность теплофизических свойств стали и увеличение диссипации тепловой энергии через зону контакта с медью обеспечены. При этом наблюдается нарастающий перегрев сварочной ванны по мере движения горячей дуги. Из термодинамики известно, что с ростом температуры в системе растет ее энтропия, т. е. увеличивается хаотичность данной системы.

Таким образом, в рассматриваемом случае имеет место третий тип самоорганизации — возникновение хаоса из порядка. Порядком можно считать исходную структуру свариваемых материалов. Представляет интерес более подробно исследовать влияние исходной геометрии медной подкладки в зоне контакта со сварочной ванной. Были рассмотрены четыре разных варианта: уменьшение толщины сплошной подкладки, фор-

мирование канавки под местом стыка, образование зазора и нанесение перфорации.

Надо отметить, что численные расчеты, проведенные с использованием первых двух типов подкладок, показали, что в обоих случаях наблюдался заметный рост температуры поверхности по длине сварочной ванны, увеличивая тем самым неоднородность температурных полей и создавая управляемый динамический хаос в системе.

Идея применения подкладок с перфорацией (см. рис. 1, в) оказалась более плодотворной. Использовали медные пластины толщиной 2 мм. Через 3 мм набивали узкие прорезы размером $4 \times 2 \text{ мм}$. Численными расчетами установлено, что температура поверхности практически одинакова по всей длине сварочной ванны, в то время, как на дне сварочной ванны температурные зависимости имеют ярко выраженный импульсный характер (рис. 5). В этом случае получаемый эффект подобен импульсно-дуговой сварке без подкладки [14]. Различие только в том, что при импульсно-дуговой сварке максимальный тепловой поток достигается в период импульса, а при сварке на постоянном токе с применением перфорированной подкладки – под зоной перфорации. Но в том и другом случаях температура внутри сварочной ванны быстро выравнивается, возникает самоорганизация тепловых процессов по типу «новый порядок из порядка». Однако, отметим, что применение перфорированных подкладок в массовом производстве невыгодно с экономической точки зрения, поскольку приводит к увеличению технологических затрат.

Наиболее рациональный способ самоорганизации по типу «новый порядок из порядка» может быть получен при сварке с применением медных подкладок с зазором.

В ходе компьютерных экспериментов были исследованы особенности формирования сварного соединения для всех типов подкладок, приведенных выше. Результаты расчетов показали, что для сварки пластин толщиной 2 мм наиболее приемлемыми оказались подкладки толщиной 2 мм

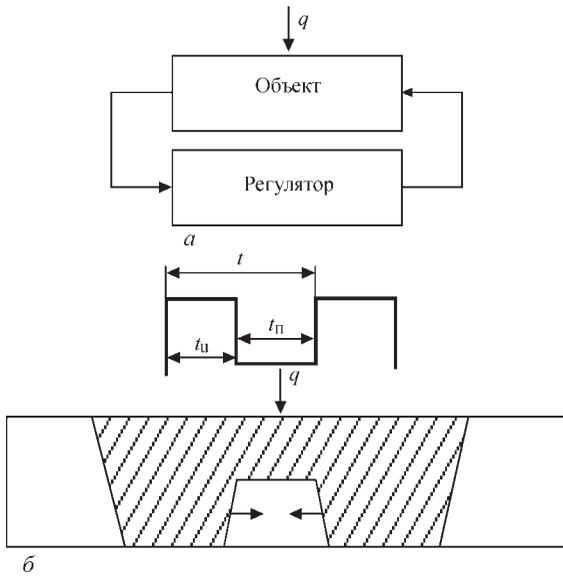


Рис. 5. Принципиальная схема распределения теплоты в сварочной ванне при сварке на перфорированной медной подкладке (а) и при импульсно-дуговой сварке (б): t_u — время в импульсе; t_n — время в паузе и при сварке

с зазором также 2 мм. Проиллюстрируем это на рис. 6, который отражает изменение температур по ширине и по глубине сварного соединения в сечениях на расстоянии 15 и 37,5 мм от лицевого торца (сечения А и С на рис. 1). В сечении В (25 мм от лицевого торца) получены аналогичные распределения температур, поэтому они не приведены в силу идентичности.

Данные распределения температур были рассчитаны при следующих режимах горения дуги: мощность $W = 1,26$ кВт, межэлектродное расстояние $d = 1,5$ мм, скорость сварки $v = 2,8$ мм/с, ширина зазора между медными подкладками $S = 2$ мм. На обоих графиках размеры сварного шва в верхнем и нижнем положениях практически одинаковы. Их определение поясним на примере рис. 6, б, где проведена еще одна дополнительная горизонтальная линия, отсекающая температуру плавления $T = 1850$ К на четырех верхних кривых, которые относятся к стальному образцу, остальные кривые относятся к медной подкладке.

Ширина отсеченных областей как раз и указывает размеры сварного шва по глубине: с лицевой стороны — 7,5 мм, с обратной стороны — 2,5 мм, что соответствует нормативным требованиям. Таким же образом, отмеряя на оси ординат температуры структурно-фазовых переходов низколегированных сталей (1523 К — неполного расплавления, 1273 К — перегрева, 1123 К — нормализации и т. д.), по ширине отсеченных областей можно установить размеры этих зон. Отметим, что по расчетным данным максимальные температуры по всей длине ванны расплава отличаются менее, чем на 100 градусов. При этом расчетное отклонение ширины сварного шва по всему образцу не превышает 0,5 мм. Таким образом, можно считать, что при данных условиях обеспечивается самоорганизация тепловых процессов по типу «новый порядок из порядка». Особую роль в этом играет правильный подбор ширины зазора медной подложки: узкий зазор или его отсутствие приводят к избыточному разогреву сварочной ванны по мере движения электрической дуги, широкий зазор не обеспечивает необходимый отток теплоты со дна сварочной ванны и не защищает ее от протекания (прожога).

Экспериментальная проверка достоверности результатов расчетов. Чтобы подтвердить правильность теоретических выводов и достоверность разработанной методики расчетов, провели экспериментальные исследования на сварном соединении из низкоуглеродистой стали СтЗсп. Была выполнена аргонодуговая сварка неплавящимся электродом на медной подкладке (с зазором 2 мм), полностью соответствующая компьютерному эксперименту. Эксперимент проводили при комнатной температуре ($T = 300$ К) с последующим охлаждением сварного соединения в естественной воздушной среде. Предварительно экспериментальную установку протестировали для определения полуэмпирических параметров модели η и $k(L)$, в результате чего получили значения: $\eta = 0,9$; $k(L) = 8$.

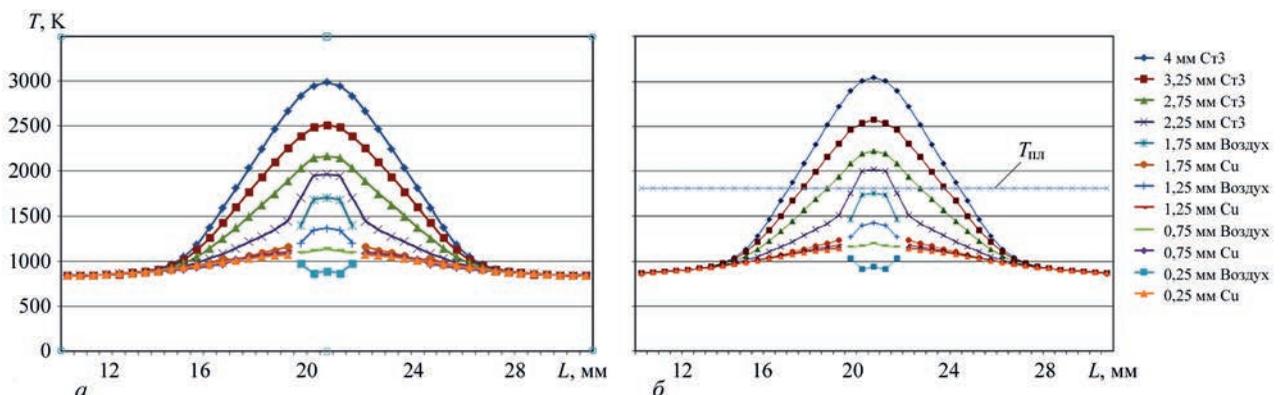


Рис. 6. Распределение температур в поперечном сечении на расстоянии 15 (а) и 37,5 мм (б) от начала сварного шва

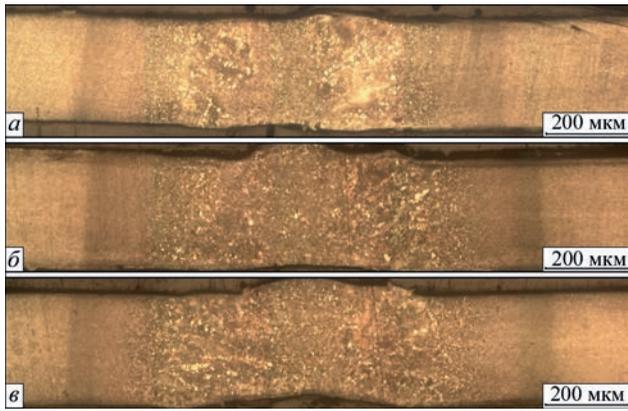


Рис. 7. Макроструктура сварного соединения в поперечных сечениях, выполненных на расстояниях: а — 15; б — 25; в — 37,5 мм от начала сварного соединения

Из эксперимента получили, что ширина сварного шва (непосредственно зоны сплавления) в верхнем и нижнем положениях с точностью до 0,5 мм совпадает с расчетной. Металлографические исследования проводили на образцах, вырезанных из сваренных пластин, расположенных в зонах: 15, 25 и 37,5 мм от начала сварного соединения. Структура зон сварных соединений изучалась с применением микроскопа Olympus – GX51 и комплекта прикладных программ SIAMS 700. Характерные особенности структуры сварного соединения представлены на рис. 7.

Обращает внимание однородность структуры по глубине и ширине сварного соединения как в области сварного шва, так и в зонах структурно-фазовых переходов. Несмотря на то, что ширина сварного шва и в расчетах, и в эксперименте сужается книзу более чем в 2 раза, макроструктура не отражает этого факта, поскольку ее размеры практически не изменяются по толщине.

В этом проявляется одно из положительных качеств технологии сварки на теплопроводящих медных подкладках с зазором. Здесь, по-видимому, сказывается эффект предварительного подогрева, осуществляемый за счет быстрой диссипации тепловой энергии из зоны сварки и передачи ее через медную подкладку нижним слоям стальных пластин. Таким образом, происходит управление процессами самоорганизации металлографических структур и упорядочивание их по толщине сварного соединения.

Выводы

1. Проведен численный анализ динамики тепловых процессов в сварочной ванне при электродуговой сварке тонколистовой низколегированной стали и проведены экспериментальные исследования, подтверждающие достоверность численных расчетов и выводов на их анализе.

2. Обнаружено, что при выполнении нормативных требований с использованием медных подкладок возможны два типа процессов самоорганизации: новый порядок на основе порядка и управляемый динамический хаос на основе порядка. Второй тип процессов самоорганизации в литературе по сварке до сих пор не обсуждался и нуждается в дополнительных исследованиях.

3. Исследованы механизмы самоорганизации и управления внутренней структурой материала, приводящие технологическую систему в порядок и позволяющие исключить навязанное ей поведение, не свойственное принципам рационального управления.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ №16-19-10010П в соответствии с планом работ 2019 г. Авторы выражают искреннюю благодарность Табанову А.М. за участие в выполнении исследований.

Список литературы

1. Калюжный В.В. (1992) *Медная подкладка*. СССР Пат. 1745489: МПК В23 К37/06. № 4799796/08.
2. Чан Туан Анъ. (1996) *Формирование корня шва при односторонней сварке стыковых соединений с помощью медных подкладок*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев.
3. Атрошенко В.В., Бычков В.М., Никифоров Р.В. и др. (2012) Численное моделирование формы проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на медной подкладке. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 16, 8(53), 89–93.
4. Nikolis, G., Prigogine, I. (1977) *Self-organization in Nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. New York, John Wiley.
5. Zuev I.V., Galkin A.G., Bushma V.O. (1995) Self-Organisation in Certain Processes of Welding and Processing Materials. *Journal of Advanced Materials*, B2, 70–74.
6. Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселев А.С. и др. (2018) Комплекс для исследования процессов дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, 8, 15–23.
7. Lebedev V.A. (2015) Mechanized and automatic synergic welding with pulsed electrode wire feed. *Welding International*, 29, 2, 140–144.
8. Starke G., Hahn D., Diana G. et al. (2016) Self-organization and Self-coordination in Welding Automation with Collaborating Teams of Industrial Robots. *Machines*, 4, 23.
9. Ефименко Л.А., Рамусь А.А., Меркулова А.О. (2015) Особенности распада аустенита в зоне термического влияния при сварке высокопрочных сталей. *Физика металлов и металловедение*, 116, 5, 520–529.
10. Кректулева Р.А., Безгинов Р.О., Черепанов О.И., Черепанов Р.О. (2015) Исследование теплофизических процессов в контактирующей паре материалов Ст3-А1 при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом. *Физическая мезомеханика*, 18, 3, 92–100.
11. Зиновьев В.Е. (1989) *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах*. Справ. изд. Москва, Металлургия.
12. Лякишев Н.П. (1996) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*: справочник. В 3т. Т.1 Лякишев Н.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
13. Krektuleva R.A., Cherepanov O.I., Cherepanov R.O. (2017) Numerical Investigation of Residual Thermal Stresses in Welded Joints of The Heterogeneous Steels With Account

- of Technological Features of Multi-Pass Welding. *Applied Mathematical Modelling*, **42**, 244–256.
14. Бежин О.Н., Косяков В.А., Кректулева Р.А. (1998) Формирование тепловых локализованных структур в сварном шве при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом. *Прикладная механика и теоретическая физика*, **39**, **6** (232), 172–177.
- References**
1. Kalyuzhny, V.V. (1992) Copper backing. USSR Pat. 1745489, Int. Cl. B23K37/06, No. 4799796/08 [in Russian].
 2. Chan Tuan An (1996) Formation of weld root in one-sided welding of butt joints using copper backings. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kiev* [in Russian].
 3. Atroshchenko, V.V., Bychkov, V.M., Nikiforov, R.V. et al. (2012) Numerical modeling of penetration shape in consumable electrode argon-arc welding on copper backing. *Vestnik Ufimskogo GATU*, **16**, 8(53), 89-93 [in Russian].
 4. Nikolis, G., Prigogine, I. (1977) *Self-organization in Nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. New York, John Wiley.
 5. Zuev, I.V., Galkin, A.G., Bushma, V.O. (1995) Self-organisation in certain processes of welding and processing materials. *J. of Advanced Materials*, **B2**, 70-74.
 6. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Kiselev, A.S. et al. (2018) Complex for investigation of arc welding processes. *The Paton Welding J.*, **8**, 13-21.
 7. Lebedev, V.A. (2015) Mechanized and automatic synergic welding with pulsed electrode wire feed. *Welding Int.*, **29**(2), 140-144.
 8. Starke, G., Hahn, D., Diana G. et al. (2016) Self-organization and self-coordination in welding automation with collaborating teams of industrial robots. *Machines*, **4**, 23.
 9. Efimenko, L.A., Ramus, A.A., Merkulova, A.O. (2015) Peculiarities of austenite decay in heat-affected zone in welding of high-strength steels. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **116** (5), 520-529 [in Russian].
 10. Krektuleva, R.A., Bezginov, R.O., Cherepanov, O.I., Cherepanov, R.O. (2015) Investigation of thermophysical processes in contacting pair of materials St3-Al in consumable electrode argon-arc welding. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, **18**(3), 92-100 [in Russian].
 11. Zinoviev, V.E. (1989) *Thermophysical properties of metals at high temperatures: Refer. book*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 12. Lyakishev, N.P. (1996) *State diagrams of binary metallic systems: Refer. book*. In: 3 Vol. Vol. 1. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 13. Krektuleva, R.A., Cherepanov, O.I., Cherepanov, R.O. (2017) Numerical investigation of residual thermal stresses in welded joints of the heterogeneous steels with account of technological features of multi-pass welding. *Applied Mathematical Modelling*, **42**, 244-256.
 14. Bezgin, O.N., Kosyakov, V.A., Krektuleva, R.A. (1998) Formation of thermal localized structures in weld during consumable electrode pulsed-arc welding. *PMTF*, **39**, **6** (232), 172-177 [in Russian].

ДИНАМІКА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОЛИСТОВОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Р.О. Кректульова, Ю.М. Сараєв, В.М. Семенчук, Р.О. Черепанов

Інститут фізики міцності та матеріалознавства СВ РАН. 634050, м. Томськ, просп. Академічний 2/4, РФ

Проведено чисельне моделювання теплових процесів при формуванні зварювальної ванни в низьколегованій сталі під впливом електричної дуги. Розглянуто різні режими горіння дуги. Виявлено якісну відмінність в поширенні та дисипації теплової енергії в залежності від режимів. Досліджено механізми самоорганізації теплових структур, зумовлені сильно нелінійними теплофізичними властивостями низьколегованої сталі, режимами подачі в зварювальну ванну теплової енергії та особливостями її дисипації на границях. Достовірність чисельної моделі підтверджена експериментально, що дозволяє результати комп'ютерних досліджень рекомендувати для практичного застосування. Бібліогр. 14, рис. 7.

Ключові слова: зварний шов, зона контакту, тепловий потік, нелінійність теплофізичних властивостей, синергетика, самоорганізація, внутрішня структура

DYNAMICS OF THERMAL PROCESSES IN WELDING SHEET LOW-ALLOYED STEEL

R.A. Krektuleva, Yu.N. Saraev, V.M. Semenchuk, R.O. Cherepanov

Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, 3/4 Akademicheskyy Ave., 634050, Tomsk, RF

Numerical modeling of thermal processes in weld pool formation in low-alloyed steel under the impact of the electric arc was performed. Different arcing modes are considered. A qualitative difference in propagation and dissipation of thermal energy is found, depending on the modes. Mechanisms of self-organization of thermal structures were studied, which are due to highly non-linear thermophysical properties of low-alloyed steel, modes of thermal energy feeding into the weld pool and features of its dissipation on the boundaries. The validity of the numerical model is confirmed experimentally, that allows recommending the results of computer studies for practical application. 14 Ref., 7 Fig.

Keywords: weld, contact zone, heat flow, non-linearity of thermophysical properties, synergism, self-organization, internal structure

Поступила в редакцію 08.07.2019