

этого отставания является применение современного точного высокоскоростного оборудования, такое оборудование выпускают и наши отечественные ведущие станкостроительные фирмы.

Резкое увеличение скорости при прочих равных условиях обеспечивает соответствующее увеличение минутной подачи инструмента, т. е. производительности процесса, а также уменьшение силы резания, наклепа и шероховатости обработанной поверхности, а значит, точности и качества обработки. Таким образом, экономический эффект от внедрения токарных и расточных резцов, фрез и другого лезвийного инструмента на основе режущих элементов из СТМ для высокоскоростного резания по труднообрабатываемым материалам со скоростями 500...3000 м/мин обеспечивается за счет повышения скорости резания в 5...10 раз, производительности обработки в 1,5...10 раз, стойкости инструмента как минимум на порядок, качества обработки поверхности по сравнению с твердосплавным инструментом. Кроме того, высокая

скорость позволяет во многих случаях осуществить обработку без СОЖ, т. е. так называемое «сухое» резание, что уменьшает затраты и улучшает экологическую обстановку на рабочем месте, а также уменьшает вредные выбросы в окружающую среду.

Скорость резания — важнейший фактор интенсификации обработки материалов резанием с применением инструмента из синтетических сверхтвердых материалов в условиях, когда резервы существенного повышения скоростей резания традиционных инструментальных материалов практически исчерпаны. Заводом «Композит» освоена и серийно выпускается широкая гамма резцов токарных и расточных с напайными пластинами твердого сплава наиболее распространенных и хорошо зарекомендовавших себя марок — Т15К6, Т5К10 и ВК8.

Использованы материалы:
<http://www.kompozit.spb.ru>



ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.791.72

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Дмитрик Виталий Владимирович, доктор технических наук, профессор
Кафедра сварки, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Барташ Светлана Николаевна

Ассистент, кафедра интегрированных технологий в машиностроении и сварочном производстве,
Украинская инженерно-педагогическая академия, ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина

У статті приведений аналіз математичних моделей температурного режиму процесів дугового зварювання, який дозволив виявити шляхи їх вдосконалення для уточнення розрахункових значень зварювального нагріву з'єднань, що виготовлялися.

Ключові слова: теплове завдання, зварювальна ванна, зона термічного впливу.

В статье приведен анализ математических моделей температурного режима процессов дуговой сварки, который позволил выявить пути их совершенствования для уточнения расчетных значений сварочного нагрева изготавливаемых соединений.

Ключевые слова: тепловая задача, сварочная ванна, зона термического влияния.

The analysis of mathematical models of a temperature mode of processes of arc welding which allowed to reveal ways of their improvement for specification of settlement values of welding heating of made connections is provided in article.

Keywords: thermal task, welding bath, zone of thermal influence.

1. Введение

Совершенствование математических моделей тепловых задач представляется актуальным для оптимизации температурного режима в области кристаллизующегося металла шва и зоне термического влияния (ЗТВ) сварных соединений. Расчетные данные составляют основу для практического обеспечения условий формирования их качественной структуры, что позволяет уменьшить количество дорогостоящих экспериментов при разработке новых сварочных технологий. Путем оптимизации сварочного нагрева изготавливаемых соединений представляется возможным улучшить качественные характеристики их структуры, что обеспечивает повышение физико-химических свойств сварных соединений, технологическую и конструкционную прочность, а также ресурс их эксплуатации.

2. Анализ

Решение известных тепловых задач основывается на применении математических моделей, соответствующих физическим условиям процессов дуговой сварки, которые включают условные допущения. Например, соответствующие начальные и граничные условия, учет теплофизических характеристик металла сварных соединений и др. Можно отметить последовательность совершенствования структур математических моделей, увеличение их соответствия физическим условиям процессов сварки, что приводит к повышению оценки температурного режима в области кристаллизующегося металла шва и ЗТВ сварных соединений [1–10].

На наш взгляд, разработки, посвященные определению температурного режима в сварных соединениях и управлению тепловыми процессами, например приведенные в работах [12–13], ввиду принципиальных различий структур их моделей и соответственно реализации следует рассматривать отдельно.

Основу математических моделей известных тепловых задач, постановка которых характеризовала физическое распространение тепла в сварных соединениях, составляли преимущественно условия закона теплопроводности Фурье. Для расчетного определения температурных полей применяют аналитические, численные и смешанные методы решения соответствующих тепловых задач.

Аналитические методы позволяют получать расчетные значения температур в свариваемых изделиях через элементарные, специальные или табулированные функции. Рассматриваемые методы обеспечивают получение общей формы решения, позволяющего определить температурный режим практически в любой точке сварных соединений, в различной степени учитывают влияние большинства допущений. В их математических моде-

лях сварочная дуга принималась как движущийся или неподвижный точечный [1, 14, 15], линейный [1, 14, 16, 17], нормально распределенный [18] или другие источники тепла. При выполнении расчетов в высокотемпературной области ЗТВ применяли комбинированные источники [7], включающие одновременный сток тепла. Теплофизические характеристики — теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, плотность, поверхностная теплоотдача преимущественно не зависели от изменения температуры. В основном в расчетах не учитывали геометрию сварных соединений, условия теплообмена на границах раздела между жидкой и твердой фазами, конвекцию в ванне, лучистый теплообмен источников тепла с окружающей средой, скрытую теплоту плавления (кристаллизации), перенос тепла расплавленным электродным металлом (капельный перенос) и другие физические эффекты процессов сварки. Приведенные допущения в аналитических методах трудно применимы ввиду необходимости удовлетворения граничным условиям сложной геометрии сварных соединений. Более полный учет допущений, соответствующий физическим условиям сварки, в значительной мере усложняет решение задач аналитическими методами.

При определении температурного режима в области кристаллизующегося металла шва и ЗТВ по совокупности показателей (эффективность решения, точность счета, оценка расчетных данных и др.) численные методы являются более универсальными и экономичными, чем аналитические.

Учет уточненных допущений в определенной мере в аналитических методах, на наш взгляд, представляется возможным. В частности, можно использовать подход, предложенный в работе [5, 19, 20], комбинировать аналитические и численные решения тепловых задач процессов дуговой сварки. Вполне вероятно, что усовершенствованный учет допущений будет использован в математических моделях последующих работ.

Расчетные данные, характеризующие распределение температур в области кристаллизующегося металла шва и ЗТВ, полученные путем использования аналитических методов, как считают [2, 4, 7, 21, 22, 23], имеют низкую сходимость с экспериментальными, в том числе существенно отличаются на участках перегрева и неполной перекристаллизации ЗТВ.

Из источников [15–18, 24, 25–30] следует, что аналитические методы получают дальнейшее развитие путем совершенствования структур их математических моделей, более полного и обоснованного учета допущений, введения поправочных коэффициентов. В [25], например, определили экспериментальную зависимость безразмерного очертания сварочной ванны от параметров режима сварки, что позволило рассчитать высокотемпературную

область термического цикла ЗТВ. В отличие от мнения [23], считаем, что необходимость дальнейшего развития аналитических методов очевидна.

Используемые численные методы решения тепловых задач процессов дуговой сварки основаны на замене непрерывной математической модели соответствующей дискретной моделью, характеризуются более универсальными возможностями, чем аналитические.

Можно отметить устойчивую тенденцию реализации тепловых задач с помощью численных методов: конечно-разностного (КРМ) [4–6, 8, 21, 31] и конечных элементов (МКЭ) [33, 34]. Основным недостатком при использовании КРМ в тепловых задачах процессов дуговой сварки заключается в его недостаточно точной аппроксимации криволинейных границ расплава ванны.

При выборе численных методов, на наш взгляд, следует использовать, наряду с известными (общими) подходами [2–3, 7–8, 31, 33, 42], индивидуальные, а также их возможные комбинации. Общие подходы можно применять для серийно используемых процессов дуговой сварки соединений одинаковых и разных толщин, имеющих стыковые, угловые, круговые и другие швы. Причем, сварные соединения могут быть тонко-, средне- и толстостенными, а также иметь одинаковый или различный химсостав. Индивидуальные подходы призваны удовлетворять решения тепловых задач, сравнительно редко применяемых процессов дуговой сварки, имеющих свою физическую специфику и усложненные граничные условия. Например, в работе [42] модель известной тепловой задачи применительно к сварке пластин из стали X18H10T и сплава Аmг6 приводили к области прямоугольной формы с учетом специального граничного условия.

Работы [1–2, 5, 43–45] составили основу для дальнейшей разработки КРМ применительно к дуговой сварке.

В работах [4, 45–48] представлены результаты численного определения температурных полей при многослойной стыковой сварке изделий с V-образной и щелевой разделками кромок. Известные математические модели процессов распространения тепла учитывали следующие допущения:

➔ каждый проход (слой) выполняли с достаточно большой скоростью, что позволяло при расчетах не учитывать поток тепла в направлении движения источника и ограничиться определением температурных полей в сечении сварных соединений;

➔ введенная в основной металл теплота мгновенно успевает распространиться на небольшую глубину, градиент температуры имеет значительную величину лишь в очень малой области, прилегающей к источнику и жидкой прослойке под дугой;

➔ средняя температура сварочной ванны составляла примерно 1550–1770 °С. Глубина проплавления основного металла равнялась 1,5–5 мм;

➔ теплофизические свойства основного и присадочного (электродного) металла имели одинаковые значения.

В работе [49] тепловую задачу с приведенными допущениями реализовали как задачу Стефана локально-одномерным методом в плоскости поперечного сечения многослойных сварных соединений.

При определении температурных полей каждого последующего прохода в качестве краевых условий принимали данные предыдущего, включая изменившуюся геометрию разделки кромок. Для объема металла шва его начальную температуру задавали равной средней температуре ванны.

КРМ позволяет свести решение дифференциальных уравнений в частных производных к решению систем алгебраических уравнений. Численные методы, используемые применительно к физическим условиям сварочного нагрева, включали построение дискретных (разностных) аппроксимаций температурных полей, изучение погрешности аппроксимаций, устойчивости, а также связанной с ними точности получения разностной схемы. В известных работах решение разностных уравнений производили различными методами [8, 21, 23, 36, 44, 50–51].

Расчет распространения тепла в основном металле за фиксированные промежутки времени Δt производили как в неподвижной (квазиустановившемся процессе сварки) [3, 8, 14, 33–34, 50, 58], так и в подвижной (движущийся источник тепла) системах координат [6, 14, 17, 21, 24, 43–44, 55]. Возможны и другие подходы, обусловленные условиями конкретных процессов сварки, удобные для расчетов. Например, в [58] допустили, что теплоотвод сохраняет постоянную нулевую температуру, а процесс теплопередачи в основном металле является квази стационарным. Тогда температурное поле $T(\xi, y)$ определяется в подвижных координатах ($\xi = x - vt$).

В известных тепловых задачах температурные поля определялись как функции координат и времени точечного [44, 50], линейного [3, 43, 54, 55], нормально-кругового [4, 21], плоского [26, 34] или других источников тепла [6, 8–9, 34, 51, 53, 56]. На наш взгляд, при моделировании источников тепла следует учитывать в более полной мере соответствие их физическим условиям процессов дуговой сварки. Нормально-круговой источник, модель которого постоянно совершенствуется, отвечает в большей мере физическим условиям процесса сварки, чем точечный и линейный.

Геометрию сварочной ванны в краевых условиях ограничивали линией солидуса [8, 31, 33, 53]. По расчетной области задавали краевые (начальные и граничные) условия, учет которых обеспечивает получение решений уравнений, характеризующих температурный режим.

Краевые условия в известных работах задавали на основе обобщенных экспериментальных данных.

Математическая форма краевых условий включала:

начальные условия $T_0 = f(x, y, z)$ при $t = 0$;

граничные условия

1-го рода $T_1 = f_1(x, y, z, t)$,

2-го рода $q = f_2(x, y, z, T_n, t)$,

3-го рода $k \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha^*(x, y, z, T_n, t)[T_n - T_c] = 0$,

4-го рода (сопряжения) — $k_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_n = -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_n$.

Тепловые нелинейные задачи процессов дуговой сварки с учетом мнения [43] можно отнести к задачам с нелинейностью 3-го рода, ввиду выделения тепла внутренних превращений как в середине объема кристаллизующегося металла шва, так и на поверхности твердой и жидкой фаз.

В работах [3–5, 8, 21, 33, 42–43, 52–53] и др. показывают удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными. В моделях данных задач учитывали геометрию сварных соединений, их краевые условия в большей мере отвечали физическим условиям процессов дуговой сварки. Разработку большинства задач производили применительно к однопроходной сварке, что сужает область их использования. Результатов численного определения тепловых полей применительно к многопроходной сварке с помощью 3-х мерных задач из-за существенной сложности их решения крайне мало [33, 50].

При реализации тепловых задач численными методами [3–4, 21, 24, 42–44, 53] в решении не учитывали избыточное количество тепла дуги, вве-

денное в основной металл и расходуемое на перегрев расплава хвостовой части ванны. Предполагали, что теплопередача при кристаллизации определяется в условиях закона Фурье, т. е. конвективные потоки в расплаве ванны отсутствуют. Температура поверхности кристаллизации в большинстве работ принималась равной температуре контактирующих жидкой и твердой фаз, т. е. переохлаждение поверхности кристаллизации в расчетах также не учитывали.

Рассматриваемые модели учитывали: скрытую теплоту плавления (кристаллизации) работы [5–6, 8, 19, 53]; лучистый (уравнение Стефана-Больцмана) [22] и конвективный (по закону Ньютона) [6, 8, 21, 33, 58], теплообмен источников тепла с окружающей средой; теплоотдачу с поверхности ванны и ЗТВ [17, 27, 31, 43, 52, 56]; конвекцию в ванне [6–7, 32, 51]. Неравномерность распределения выделяемого по активной области дуги (основание столба дуги) тепла преимущественно учитывали с помощью коэффициентов его сосредоточенности [31, 34, 44]. Оценку учета распространения тепла по рабочей области источника, контактирующего непосредственно с жидким металлом ванны, можно повысить, воспользовавшись результатами работ [39] и др.

3. Выводы

Для повышения оценки температурного режима в области кристаллизующегося металла шва и ЗТВ, что обеспечивает улучшение качественных характеристик сварных соединений, возникла необходимость совершенствования математических моделей тепловых задач, в том числе уточнение принимаемых в них допущений.

Литература

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. — М. : Машиностроение, 1951. — 296 с.
2. Махненко В. И. Применение ЭВМ при исследованиях и разработке технологических процессов сварки [Текст] / В. И. Махненко. — М. : Машиностроение, 1975. — 66 с.
3. Недосека А. Я. Распределение температуры при действии на поверхность пластины сосредоточенного источника тепла [Текст] / А. Я. Недосека, В. А. Санченко, Г. А. Ворона // Автоматическая сварка. — 1977. — № 6. — С. 1–4.
4. Ларионов В. П. Особенности теплового баланса ванны при сварке в условиях низких климатических температур [Текст] / В. П. Ларионов, А. Р. Павлов, А. П. Аммосов // Автоматическая сварка. — 1981. — № 10. — С. 22–24.
5. Барташ С. Н. Расчетное определение сварочного нагрева изготавливаемых соединений из теплоустойчивых перлитных сталей [Текст] / С. Н. Барташ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 1/1(31). — С. 50–52.
6. Коган М. Г. Поле температур в зоне соединения [Текст] / М. Г. Коган, В. Н. Крюковский, В. И. Писарский // Автоматическая сварка. — 1979. — № 9. — С. 8–10.
7. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности [Текст] / Л. А. Коздоба. — М. : Наука, 1975. — 222 с.
8. Дмитрик В. В. Расчет температурного режима при электродуговой сварке с дополнительной присадочной проволокой [Текст] / В. В. Дмитрик, Н. А. Ильенко // Известия вузов. — М. : Машиностроение. — 1987. — № 3. — С. 126–129.

9. Дмитрик В. В. Анализ расчетных методик определения температурного режима в области кристаллизующегося металла шва и ЗТВ с учетом движения жидкого металла в ванне [Текст] / В. В. Дмитрик, Н. А. Ильенко // Труды всесоюзной конф. «100-летие сварки по методу Н. Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства». — Пермь. — 1988. — С. 19–20.
10. Судник В. А. Применение ЭВМ в сварочном производстве [Текст] / В. А. Судник // Итоги науки и техники. — М. : ВИНТИ АН СССР. Сварка. — Т. 18. — 1987. — С. 3–71.
11. Киселевский Ф. Н. Стабилизация температурного поля в зоне термического влияния при дуговой сварке [Текст] / Ф. Н. Киселевский, Г. А. Бутаков, А. Ю. Далецкий // Автоматическая сварка. — 1986. — № 7. — С. 6–9.
12. Углов А. А. О численном решении некоторых задач оптимального управления тепловыми процессами при сварке плавлением [Текст] / А. А. Углов, В. В. Мелюков // Физика и химия обработки материалов. — 1977. — № 1. — С. 130–134.
13. Углов А. А. Об оптимальном управлении тепловыми процессами сварки при квазистационарном состоянии [Текст] / А. А. Углов, В. В. Мелюков // Физика и химия обработки материалов. — 1977. — № 3. — С. 39–41.
14. Бирман У. И. Особенности расчета тепловых процессов при сварке с принудительным охлаждением локально направленными струями [Текст] / У. И. Бирман, А. В. Петров, В. А. Полуаршинов и др. // Сварочное производство. — 1983. — № 4. — С. 6–7.
15. Николов Д. Г. О моделировании тепловых источников при дуговой сварке [Текст] / Д. Г. Николов, М. Ц. Трифонов, А. И. Букев // Сварочное производство. — 1987. — № 6. — С. 34–36.
16. Луневский Н. И. Тепловые процессы при сварке деталей из высокоуглеродистой тонколистовой стали [Текст] / Н. И. Луневский, Ю. Г. Богданов // Автоматическая сварка. — 1969. — № 6. — С. 5–10.
17. Рыкалин Н. Н. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы [Текст] / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, Л. М. Анищенко. — М. : Наука, 1986. — 171 с.
18. Калев Л. Ц. Расчет температурных полей при сварке магнитно-управляемой дугой с изменяющейся во времени мощностью [Текст] / Л. Ц. Калев, В. Г. Михайлов, Г. П. Вылев // Сварочное производство. — 1986. — № 10. — С. 32–33.
19. Беляев В. Н. Расчет температурных полей при сварке меди со сталью в твердожидкой фазе [Текст] / В. Н. Беляев // Сварочное производство. — 1988. — № 3. — С. 32.
20. Щетинина В. И. Регулирование процесса распространения теплоты при сварке комбинированным электродом [Текст] / В. И. Щетинина, Л. К. Лещинский, Б. Б. Сологуб и др. // Сварочное производство. — 1987. — № 3. — С. 32–34.
21. Dunja Martinovic. Proracun trodimenzionalnog temperaturnog polja nastalog pri kruznom zavarivanju ploca I njegova dvodimenzionalna aproksimacija / Smet Demirdzic // Zavorivanje. — 1986. — № 1. — S. 5–14.
22. Громовик В. П. Термонапряженное состояние цилиндрической оболочки, вызванное движущимся источником тепла [Текст] / В. П. Громовик, М. С. Яворовский // Физика и химия обработки материалов. — 1986. — № 2. — С. 43–48.
23. Судник В. А. Численное моделирование тепломассообмена в сварочной ванне при дуговом нагреве [Текст] / В. А. Судник // Автоматизация технологии подготовки сварочного производства. — Тула : ТПИ. — 1986. — С. 50–60.
24. Введение в проекционные сеточные методы [Текст] / Г. И. Марчук, В. И. Аюшков. — М. : Наука, 1991. — 414 с.
25. Krurz G. W. Finite Element Analysis of Welded Structures [Текст] / G. W. Krurz, L. J. Segerling // Welding Journal. — 1978. — № 7. — P. 211–216.
26. Христенко В. Н. Программа расчета температурных полей при сварке с использованием метода конечных элементов [Текст] / В. Н. Христенко, В. Е. Орлов, Ф. В. Толстой и др. // Прогрессивная технология судостроения и сварочного производства. — Николаев : НКСИ, 1986. — С. 16–22.
27. Самарский А. А. Разностные схемы газовой динамики [Текст] / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. — М. : Наука, 1975. — 286 с.
28. Бребия К. Применение методов граничных элементов в технике [Текст] / К. Бребия, С. Уокер. — М. : Мир, 1982. — 244 с.
29. Громадко Т. Комплексный метод граничных элементов [Текст] / Т. Громадко, Ч. Лей. — М. : Мир, 1990. — 300 с.
30. Михлинс Г. Вариационные методы в математической физике [Текст] / Г. Михлинс. — М. : Наука, 1970. — 510 с.
31. Калиниченко В. И. Численные решения задач теплопроводности [Текст] / В. И. Калиниченко, А. Ф. Коций, А. И. Ропавка. — Харьков : Вища школа, изд-во Харьковского ун-та, 1987. — 112 с.
32. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения [Текст] / В. Л. Рвачев. — Киев : Наукова думка, 1982. — 542 с.
33. Зарубин В. С. Инженерные методы решения задач теплопроводности [Текст] / В. С. Зарубин. — М. : Энергоиздат, 1983. — 328 с.
34. Юматова В. И. Температурное поле при сварке разнородных пластин с заданной формой разделки кромок [Текст] / В. И. Юматова, В. Р. Рябов, В. И. Махненко и др. // Автоматическая сварка. — 1973. — № 11. — С. 31–34.

35. Казимиров А. А. Расчет распределения тепла при сварке пластин встык с учетом влияния температуры на их физические свойства [Текст] / А. А. Казимиров, А. Я. Недосека, В. А. Санченко // Автоматическая сварка. — 1973. — № 11. — С. 28–30.
36. Недосека А. Я. Распределение температуры в пластинах с источником сварочного нагрева на различной глубине [Текст] / А. Я. Недосека, О. И. Чернова // Автоматическая сварка. — 1977. — № 7. — С. 1–4.
37. Ларионов В. П. Расчетный метод исследования температурного поля при многослойной сварке [Текст] / В. П. Ларионов, А. П. Павлов, А. П. Амосов и др. // Автоматическая сварка. — 1981. — № 4. — С. 16–18.
38. Данилюк И. И. Двухслойная нестационарная задача Стефана при наличии теплового удара [Текст] : доклады АН УССР / И. И. Данилюк, В. И. Олейник // Физико-математические и технические науки. — Киев. — 1986. — № 5. — С. 5–7.
39. Martinovis D. Proracun trodimenzionalnog temperaturnog pola nastalog pki Kruznom zavarivanju ploca i njegova dvodimenzionalna aproksimacija [Текст] / D. Martinovis, I. Demirdzic // Zavorivanje. — 1986. — № 1. — С. 5–14.
40. Штрыкман М. М. Аналитическое и экспериментальное исследование тепловых процессов при многослойной сварке в щелевую разделку [Текст] / М. М. Штрыкман // Сварочное производство. — 1993. — № 10. — С. 4–6.
41. Ларионов В. П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении [Текст] / В. П. Ларионов. — Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1986. — 253 с.
42. Прохоров Н. Н. Особенности температурных полей при сварке в защитных газах вертикальных стыков [Текст] / Н. Н. Прохоров, С. И. Никольская, А. В. Чавдаров // Автоматическая сварка. — 1981. — № 7. — С. 21–24.
43. Kou S. Computer Ssmulamion of Convection in Moving Arc Weld Pools [Текст] / S. Kou, Y. H. Wang // Metallurgical transactions. — 1986. — Vol. 17A. — № 12. — P. 2271–2277.
44. Судник В. А. Теплофизические модели и прикладные программы расчетов на ЭВМ температурных полей при сварке плавлением тонкостенных соединений [Текст] / В. А. Судник // Сварка цветных металлов. — Тула : ТПИ, 1985. — С. 18–28.
45. Махненко В. И. Оценка тепловых процессов вблизи движущейся сварочной ванны [Текст] / В. И. Махненко, Л. А. Петун, В. П. Прилуцкий и др. // Автоматическая сварка. — 1969. — № 10. — С. 1–5.
46. Гатовский К. М. Определение температурных полей при решении задач о сварочных деформациях и напряжениях / К. М. Гатовский, Г. Ю. Полишко, С. К. Михайлов и др. // Автоматическая сварка. — 1978. — № 10. — С. 29–33.
47. Махненко В. И. Расчет тепловых процессов при сварке композиционных материалов [Текст] / В. И. Махненко, С. А. Вакуленко, В. Ф. Демченко, В. Р. Рябов // Автоматическая сварка. — 1986. — № 9. — С. 1–4.
48. Зуев М. А. Анализ динамики температурных режимов при сварке трубчатых конструкций [Текст] / М. А. Зуев, Б. А. Каргашкин, Н. Г. Фролов и др. // Автоматизация технологии подготовки сварочного производства. — Тула : ТПИ, 1986. — С. 31–37.
49. Веселин-Михайлов. Тепловые процессы при сварке с плоским неподвижным источником тепла с изменяющейся во времени мощностью [Текст] / Веселин-Михайлов // Техническая мысль. — 1987. — № 2. — С. 111–114.
50. Пивторак Н. И. Исследование температурных циклов при шагодуговой сварке толстолистового металла [Текст] / Н. И. Пивторак, А. Н. Сиренко, А. Д. Размышляев и др. // Автоматизация технологии подготовки сварочного производства. — Тула : ТПИ, 1986. — С. 92–97.
51. Махненко В. И. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров [Текст] / В. И. Махненко, Т. Г. Кравцов. — Киев : Наукова думка, 1976. — 156 с.
52. Pelli T. Berechnung der Temperaturverteilung beim Anschmelzen einer Platte [Текст] / T. Pelli // Schweiden und Schneiden. — 1974. — № 8. — S. 299–303.
53. Зражевский В. А. Оценка коэффициента сосредоточенности нормально распределенного сварочного источника тепла [Текст] / В. А. Зражевский, Г. Н. Игнатенко // Автоматическая сварка. — 1981. — № 11. — С. 25–28.
54. Петров А. В. Применение метода источников для расчета тепловых процессов при импульсно-дуговой сварке [Текст] / А. В. Петров // Физика и химия обработки материалов. — 1967. — № 5. — С. 10–12.
55. Doina Draculescu. Studiul cimpului termic la sudarea mecanizata sub flux [Текст] / Petre Cioara // Sudura si incerc plater. — 1986. — № 4. — P. 16–25.
56. Мечев В. С. Аксиальное распределение температуры электрической дуги в аргоне [Текст] / В. С. Мечев, Л. Е. Ерошенко // Автоматическая сварка. — 1975. — № 6. — С. 14–17.
57. Maruo H. Studu on pulsed MIG Welding [Текст] / H. Maruo, Y. Hirata // International Institute of Welding. ICW Document. — 1984. — P. 1–16.
58. Зуев И. В. Самоорганизация (синергетика) процессов сварки и пайки. Работа формирования шва [Текст] / И. В. Зуев. // Сварочное производство. — 1995. — № 9. — С. 13–19.