

ВИАМ/2013-Тр-09-03



УДК 621.791.14

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ
МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ**

М.Л. Саморуков

Сентябрь 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№9, 2013 г.

УДК 621.791.14

М.Л. Саморуков

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Рассмотрены примеры аналитического подхода к математическому моделированию температурной составляющей технологического процесса ротационной сварки трением. Показаны подходы к моделированию для получения наилучшей сходимости с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: *ротационная сварка трением, математическое моделирование, температурные поля, тепловой поток.*

M.L. Samorukov

ANALYTICAL APPROACH TO MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE COMPONENT OF DIRECT DRIVE FRICTION WELDING

The examples of analytical approach to mathematical modeling of temperature component of direct drive friction welding are observed. The approaches to the modeling resulted to the good convergence are shown.

Key words: *direct drive friction welding, mathematical modeling, temperature fields, heat flow.*

В условиях необходимости технологического и технического развития для преодоления отставания от ведущих мировых держав и для наращивания промышленного и научного потенциала с целью обеспечения приоритета российской наукоемкой продукции на мировой арене [1, 2], необходимо изучать и развивать возможности математического и компьютерного моделирования для решения наукоемких задач материаловедения. Подобные методы широко используются при выборе систем легирования жаропрочных литейных и деформируемых сплавов [2, 3], сталей со специальными свойствами [2, 4, 5], разработке технологий нанесения покрытий [7], исследовании поведения материалов в агрессивных средах [8], выборе оптимальных режимов термомодеформационного воздействия [9] на материалы с целью получения заданного комплекса свойств и т. д.

Аналитический подход к моделированию процесса сварки трением

Сварка трением процесс с взаимосвязанными термическими и деформационными циклами, протекающими в шве и околошовной зоне. В процессе сварки происходит разогрев металла в приконтактной области вследствие действия сил трения. В результате разогрева предел прочности материала в приконтактной зоне снижается, и материал под действием осевого давления выдавливается в грат. Технологический процесс сварки трением включает в себя два этапа: нагрев и проковку [10]. На этапе нагрева происходит разогрев контактной области заготовок в результате действия сил трения при взаимном вращении под действием осевого усилия. Основными технологическими параметрами на этом этапе являются давление (P_n) и время нагрева (t_n). На этапе проковки происходит резкое торможение вращения заготовок и увеличение осевого давления в 1,5–2,5 раза. На этом этапе основными технологическими параметрами являются давление проковки ($P_{пр}$) и время ($t_{пр}$). Следовательно, при математическом моделировании процесса сварки трением необходим расчет температурных полей на обоих этапах. Кроме того, необходимо учитывать и скорость деформации, которая при нагреве может быть условно принята как постоянная величина, а при проковке – переменной, так как вначале происходит резкое торможение и одновременное возрастание осевого усилия в 1,5–2,5 раза. В течение этого короткого отрезка времени происходит значительная осевая деформация свариваемых заготовок. Ввод тепла, по мнению автора, на этом этапе также следует принимать постоянным. Далее – давление остается постоянным, скорость вращения отсутствует, относительная осевая деформация равна нулю, силы трения работы не совершают, формируется сварное соединение. Происходит тепловое перераспределение от сварного стыка вдоль соединяемых деталей и теплоотдача в окружающую среду. Таким образом, для достоверного моделирования процесса ротационной сварки трением имеет смысл выделить три этапа:

- этап нагрева, характерный действием давления нагрева, взаимным вращением заготовок, работой сил трения, а значит наличием источника энергии в контакте – на этом этапе происходит интенсивный разогрев заготовок и частичная их деформация;
- промежуточный этап, когда скорость вращения уменьшается до нуля, а давление увеличивается до значения давления проковки и обеспечивает условно равномерное линейное перемещение и выход в грат дополнительного объема материала;

– этап проковки, характерный отсутствием линейного перемещения, взаимного вращения и работы сил трения. В контакте действует давление проковки. Происходит процесс теплового перераспределения и формирование сварного соединения.

Аналитический подход расчета термических процессов при сварке трением представлен в монографиях [11, 12]. В основу аналитического метода расчета тепловых процессов при сварке положен закон теплопроводности Фурье [12], который устанавливает количественную связь между теплопроводностью материала, градиентом температуры и удельным тепловым потоком в твердых телах:

$$q_2 = -\lambda \cdot \text{grad}T. \quad (1)$$

Знак минус означает, что поток тепла направлен в сторону, противоположную возрастанию температуры. Для упрощения расчета имеет смысл принять, что источник тепла равномерно распределен и не изменяется во времени в течение этапа.

Расчет температурной составляющей на первом этапе следует вести с учетом того, что источник энергии равномерно распределен по поверхности контакта F , является плоским и движется равномерно со скоростью v вдоль оси заготовки, а боковая поверхность стержня отдает теплоту в окружающую среду с нулевой температурой при коэффициенте поверхностной теплоотдачи a :

$$T(x, t) = T_H + \frac{q}{c_p F \sqrt{4\pi a}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \exp\left(-\left[\frac{v^2}{4a} + b\right]\tau - \frac{x^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}. \quad (2)$$

Расчет тепловых полей на второй стадии процесса сварки следует также вести по формуле (2), однако скорость движения источника в этом случае увеличивается в 3–5 раз. Опытным путем установлено, что осадка, получаемая на этом этапе, равна 50–60% от суммарной осадки за весь технологический цикл. Длительность этой стадии может достигать 0,5 с. Причем скорость осадки и ее величина на этом этапе зависят от длительности первого этапа и от отношения давления проковки к давлению нагрева. Чем больше значение этого отношения, тем на большую величину деформируется заготовка и тем выше скорость деформации. Предельная граница деформации при этом должна удовлетворять условию:

$$P_{\text{пр}} = \sigma_{\text{в.сж}}^T \cdot F, \quad (3)$$

где $P_{\text{пр}}$ – осевое усилие проковки; $\sigma_{\text{в.сж}}^T$ – предел прочности при сжатии; F – площадь контакта.

Расчет температурного поля на третьем этапе следует рассчитывать как разность приращений температур от источника и стока теплоты:

$$\Delta T = \frac{q_2|x|}{\lambda} \left[\frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right)}{\sqrt{\frac{\pi x^2}{4at}}} + \Phi\left(\sqrt{\frac{x^2}{4at}}\right) - \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-t_H)}\right)}{\sqrt{\frac{\pi x^2}{4a(t-t_H)}}} - \Phi\left(\sqrt{\frac{x^2}{4a(t-t_H)}}\right) \right]. \quad (4)$$

Таким образом, основной задачей является расчет теплового потока от действия сил трения при контакте материалов на этапе нагрева – задача, решаемая как аналитическим, так и численным методами. Аналитический способ ее решения представлен в работах [11–19].

Так, в работе [13] авторы разрабатывали и исследовали модель термического цикла сварки трением применительно к цилиндрическим образцам различных диаметров из углеродистой стали AISI 1040.

Авторы рассчитывали тепловой поток, выделяемый при контакте материалов, следующим образом:

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot R^3. \quad (5)$$

Тепловой поток, выделяемый в любой точке контакта, по версии авторов, равен:

$$\dot{q} = \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r. \quad (6)$$

В статье [14] авторы приводят информацию по моделированию ротационной сварки трением образцов из низкоуглеродистой стали 20.

Показано, что тепловой поток, образующийся в контактной поверхности, равен:

$$q = \frac{\eta \cdot \tau \cdot \omega \cdot r^2}{R + (1 - \eta) \tau \cdot \omega \cdot R}, \quad (7)$$

где q – тепловой поток в контакте; η – коэффициент неравномерности давления и несоосности; τ – касательное напряжение; ω – скорость вращения; r – расстояние от оси вращения; R – радиус заготовки.

Авторы статьи [14] разработали двухмерную модель сварки трением методом конечных элементов и получили высокую сходимость полученных результатов с экспериментальными данными.

В работе [15] авторы сравнивают результаты расчетов температурных полей при сварке трением, полученных с помощью различных математических моделей. Интерес представляет результат решения обратной задачи теплопроводности, приведенный авторами. Была получена наиболее высокая сходимость с экспериментальными

данными в отличие от подхода, связанного с применением постоянного коэффициента трения [13], который приводит к высокой степени неточности в решении. Построенная авторами [15] трехмерная модель методом конечных элементов с учетом рассчитанных значений теплового потока в контакте и экспериментально определенных значений скорости осадки показывает, что для решения термомеханической задачи достаточно одномерной модели, по причине короткого времени нагрева и допущения о равномерности теплообразования по поверхности контакта. Модель также показывает, что объем энергии, полученный от пластической деформации материала, мал по сравнению с объемом энергии, полученной от работ сил трения, и его можно не учитывать в расчетах.

При решении обратной задачи теплопроводности авторы [15] определяли температуру и объем тепловыделения при контакте «деталь–деталь». В отличие от прямого подхода, при котором температурные поля в детали определяются как зависимость от температуры в контакте, в обратной задаче температура и объем теплообразования при контакте определяются через значения температур, измеренных на поверхности заготовки. Авторы [15] ставили перед собой цель разработать модель сварки трением с использованием обратной задачи. Температура вблизи зоны контакта определялась термопарами, а тепловой поток при контакте авторы определяли с помощью метода конечных разностей.

Далее авторы [15] применили данные, полученные при решении обратной задачи теплопроводности, для моделирования методом конечных элементов сварки трением. Данные по скорости и величине осадки были получены экспериментально.

Наиболее точные данные по объему теплообразования и температурным полям при ротационной сварке трением могут быть получены решением обратной задачи теплопроводности. Тогда как модели процесса, основанные на постоянном коэффициенте трения, либо на дроблении процесса сварки на этапы и заданием постоянных коэффициентов для каждого из этапов, дают погрешность и не могут характеризовать процесс сварки в полной мере. Однако для экспресс-анализа эти методы очень удобны по причине относительной простоты применяемых математических выражений.

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–51.
4. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситостареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 81–86.
5. Тонышева О.А., Вознесенская И.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотсодержащая сталь повышенной надежности //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 84–88.
6. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
7. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.
8. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Развитие механизмов водородной и бейнитной хрупкости конструкционной стали в процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 88–93.
9. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 141–147.
10. Лебедев В.К., Черненко И.А., Михальски Р. и др. Сварка трением: Справочник. Л.: Машиностроение. 1987. С. 27–42.
11. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: МАШГИЗ. 1951. 296 с.

12. Коновалов А.В., Куркин А.С., Макаров Э.Л. и др. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. 752 с.
13. Can A., Sahin M., Küçük M. Thermically evaluation and modelling of friction welding //Strojarstvo. 2009. V. 51. №1. P. 5–13.
14. Wenyu Li, Feifan Wang Modeling of continuous drive friction welding of mild steel //Materials Science and Engineering A. 2011. V. 528. №18. P. 5921–5926.
15. Maalekian M., Kozeschnik E., Brantner H.P., Cerjak H. //Acta Materialia. 2008. V. 56. №12. P. 2843–2855.
16. Medhat Awad, Hadek El. Numerical Simulation of Inertia Friction Welding Process //International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. 2009. V. 10. №3. P. 224–230.
17. Grant B., Preuss M., Withers P.J., Baxter G., Rowlson M. Finite element process modelling of inertia friction welding advanced nickel-based superalloy //Materials Science and Engineering A. 2009. (513–514). P. 366–375.
18. Wang L., Preuss M., Withers P.J., Baxter G.J., Wilson P. Residual stress prediction for the inertia welding process //Journal of Neutron Research. 2004. №12. C. 21–25.
19. Hazman Seli, Ahmad Izani, Md. Ismail, Endri Rachman, Zainal Arifin Ahmad. Mechanical evaluation & thermal modeling of friction welding of mild steel & aluminium //Journal of materials processing technology. 2010. P. 1209–1216.