

Научная статья
УДК 621.791
doi:

Физико-механическое моделирование сварки трением с перемешиванием

Али Юсупович Албагачиев, д.т.н.
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
albagachiev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6874-0561>

Аннотация. Приведены результаты расчета численного решения уравнения механики сплошной среды для пластического течения и аналитические модели для исследования теплофизики при сварке трением с перемешиванием.

Ключевые слова: модель, трение, сварка, пластическое течение, температура

Для цитирования: Албагачиев А.Ю. Физико-механическое моделирование сварки трением с перемешиванием // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 4 (142). С. 24–29. doi:

Physico-mechanical modeling of friction stir welding

Ali Yu. Albagachiev D.Eng.
IMS RAS named after A.A. Blagonravov
albagachiev@yandex.ru

Abstract. The results of numerical calculation of the continuum mechanics equation for continuous medium plastic flow and analytical models studying thermophysics at friction stir welding are given.

Keywords: model, friction, welding, plastic flow, temperature

For citation: Albagachiev A.Yu. Physico-mechanical modeling of friction stir welding / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023. № 4 (142). P. 24–29. doi:

Введение

Сваркой трением с перемешиванием (СТП) получают неразъемные соединения как одноименных, так разноименных металлов и полимерных материалов в авиакосмической, судовой, железнодорожной и других транспортных отраслях. Бурное развитие СТП получила в зарубежных производствах ведущих стран мира и в Российской Федерации [1 – 8].

Сущность метода СТП – вращающийся инструмент перемещается по стыку свариваемых деталей с нормальной нагрузкой (рис. 1). Заплекник придавливая сварочный шов предохраняет его от вспучивания (наплыва), а спин, разрушая окисные пленки и перемешивая пластифицированные сварочные

материалы, способствует появлению сварочного шва.

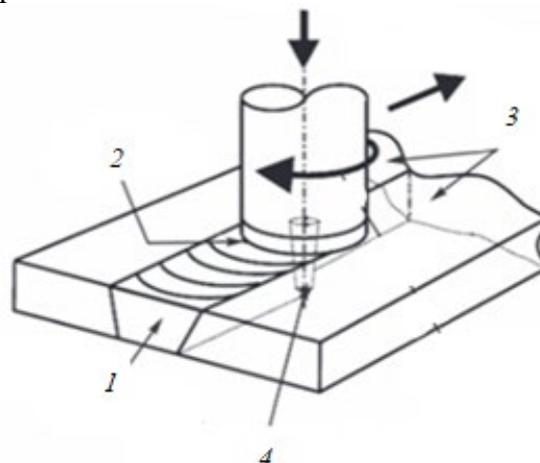


Рис. 1. Схема сварки трения с перемешиванием:
1 – шов; 2 – заплекник; 3 – свариваемые объекты; 4 – спин

Метод СТП имеет явные преимущества по сравнению со всеми другими видами сварки по:

– способу реализации технологии СТП (сварка осуществляется без подвода энергии для плавления, без использования присадочного материала и защитного инертного газа, метод достаточно прост в реализации – вращающийся инструмент состоящий из заплечика и пина, перемещаясь в зоне стыка и разрушая окисные пленки на свариваемых поверхностях, осуществляет с высокой производительностью сварку при относительно невысокой температуре);

– качеству сварного соединения (статическая и усталостная прочность соединения, коррозионная стойкость, уровень сварочных деформаций);

– технологичности (низкие трудоёмкость и энергоёмкость, и высокая экологическая безопасность).

Паразитные свойства сварного соединения, а также особенности процесса перемешивания пластифицированного материала вызывают необходимость изучения и осмысления физико-механических явлений, сопровождающих процесс соединения объектов.

Как представляется, более глубокое погружение в «физику и механику» процесса СТП (например, за счет изучения контактных явлений взаимодействия деформируемых материалов) вполне позволит выработать рекомендации технологам и инженерам, занимающимся разработкой инструментов и подбором оптимальных режимов СТП для конкретных материалов.

Попытка такого погружения предлагается в настоящей статье.

Численное моделирование температуры и скорости течения свариваемых объектов при сварке трением с перемешиванием

Для описания текучести свариваемых металлов при СТП в данной работе использованы уравнения в частных производных механики сплошной среды. В качестве основного допущения принималась жесткопластическая модель несжимаемого деформируемого материала.

Для установившегося режима процесса сварки вводилась цилиндрическая система координат начало которой помещалась на оси

пина. В этой системе координат в установившемся режиме область пластического течения неподвижна, а свариваемые тела движутся со скоростью v в направлении, перпендикулярном оси инструмента. Дифференциальные уравнения установившегося движения в области пластического течения с начальными и граничными условиями решались численно с их заменой на конечно – разностные уравнения [5]. Полученная система нелинейных алгебраических уравнений рассматривалась методом Ньютона-Рафсона.

Расчеты по разработанной модели проведены для сварки алюминиевых пластин при следующих значениях параметров:

плотность $\rho = 2640 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; теплопроводность

$\lambda = 122 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$; теплоемкость $c = 922 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$;

коэффициент теплоотдачи $k = 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$;

давление со стороны заплечика на свариваемые детали $p = 30$ МПа; коэффициент трения $f_i = 0,3$; радиус заплечика $R_z = 9,5$ мм; радиус пина $R_p = 3,95$ мм; толщина свариваемых деталей $L = 6,35$ мм; скорость сварки $v = 1 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$; угловая скорость $\omega = 30 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

значение коэффициента распределения тепла $\alpha_{ТП} = 0,7$.

Распределение температуры по радиальной координате на разных глубинах при угловой координате $\varphi = \pi$, приведено на рис. 2.

Полученные результаты расчетов показывают, что температура поверхностей заплечика и заготовок в области их контакта быстро убывает с ростом координаты r при значениях $r > 9$ мм. Это связано с тем, что со свободной поверхности заготовок происходит интенсивное тепловое излучение по закону Стефана-Больцмана. В результате температура возрастает при удалении от поверхности вглубь заготовки при значениях $r > 9$ мм. При значениях $r > 8,5$ мм температура заготовок ниже 400 °С. Параметр σ_s при этом имеет высокое значение и пластическое течение становится затрудненным.

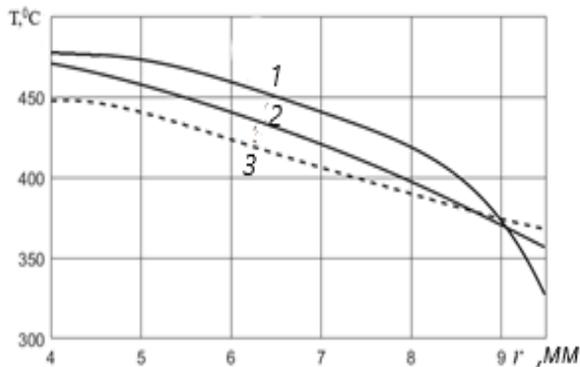


Рис. 2. Изменение температуры по радиусу на разной глубине заготовок:

1 – на поверхности, граничащей с заплечиком; 2 – на глубине $z = 5,7$ мм; 3 – на поверхности, граничащей с подложкой

Скорость пластического течения материала в зависимости от координаты z при различных значениях координаты r приведена на рис. 3.

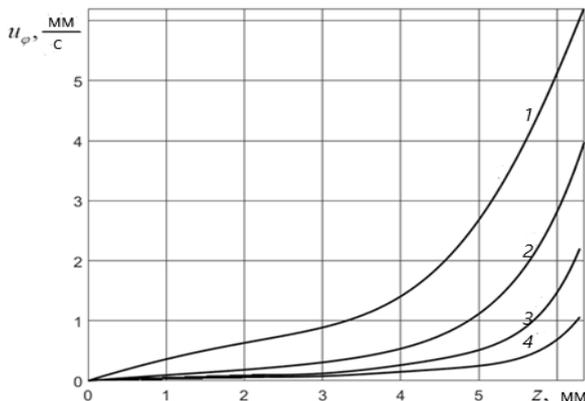


Рис. 3. Распределение скорости пластического течения по толщине заготовок при угловой координате $\varphi = 0$ и при различных значениях радиальной координаты:

1 – при значениях $r = 5$ мм; 2 – при значениях $r = 6,16$ мм; 3 – при значениях $r = 7,27$ мм; 4 – при значениях $r = 9,48$ мм

Из приведенных результатов расчетов следует, что интенсивное пластическое течение, обеспечивающее перемешивание материала свариваемых заготовок, имеет место в поверхностном слое заготовок толщиной порядка 3 мм. При малых значениях z перемешивание материала свариваемых заготовок осуществляется только в небольшой окрестности пина.

На рис. 4 приведены зависимости скорости пластического течения (а) и

температуры (б) от угловой координаты при $r = 5$ мм и различных значениях координаты z .

Из результатов, приведенных на рис. 4, следует, что температура слабо изменяется по угловой координате, в то время как скорость пластического течения изменяется существенно. В области $0 < \varphi < \pi$ сила трения, действующая со стороны заплечика на свариваемые заготовки, способствует росту скорости пластического течения, а в области $0 < \varphi < 2\pi$ – тормозит пластическое течение. В результате в области $0 < \varphi < \pi$ скорость пластического течения существенно выше скорости в области $0 < \varphi < 2\pi$. Максимальное значение скорости имеет при $\varphi \approx \pi/2$, а минимальное – при $\varphi \approx 3\pi/2$.

При значениях $z < 3,8$ мм, в окрестности угловой координаты $\varphi = 3\pi/2$ пластическое течение, практически, отсутствует.

Из приведенных результатов следует, что перемешивание материалов свариваемых заготовок осуществляется в основном в области входа заготовок в зону контакта с заплечиком.

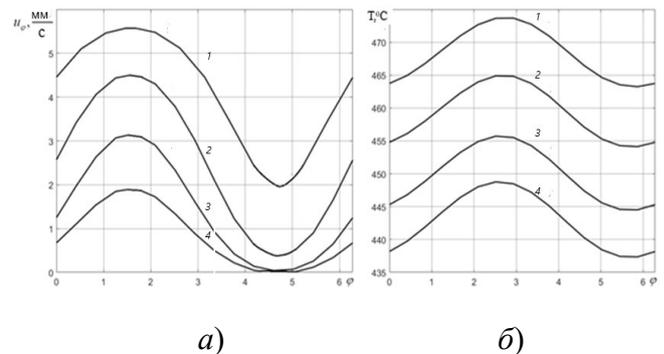


Рис. 4. Изменение скорости пластического течения (а) и температуры (б) по угловой координате:

1 – при значениях $z = 5,7$ мм; 2 – при значениях $z = 4,9$ мм; 3 – при значениях $z = 9,8$ мм; 4 – при значениях $z = 2,2$ мм

Таким образом, численным методом установлено закономерность изменения скорости течения для алюминия и определена температура сварки при СТП максимальная величина которой составляет 4730 °С, что близко к экспериментальному оптимальному значению.

Теплофизические модели для СТП

Перегрев, связанный с технологическими режимами сварки при турбулентном обтекании инструмента пластифицированным металлом (рис. 5), как и недогрев инструмента и свариваемых объектов приводят к снижению усталостной прочности сварочного шва за счет образования в нем пор и возникновению трещин под влиянием температурных растягивающих остаточных напряжений [3, 4, 5], поэтому они недопустимы.

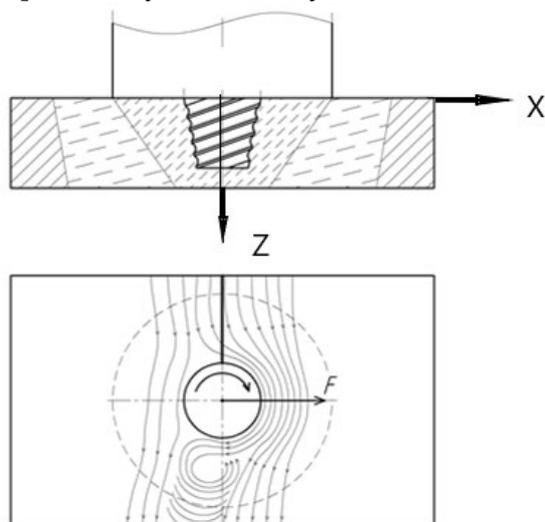


Рис. 5. Схема обтекания инструмента пластическими материалами

Следует отметить, что максимально мощный источник тепла возникает при трении пары «запечник – свариваемые поверхности». В остальных зонах СТП мощность источника тепла значительно ниже и составляет 20 % от мощности источника тепла пары трения «запечник – свариваемые поверхности». Таким образом учитывая, что важнейшим параметром при назначении технологических режимов СТП (скорости вращения и перемещения инструмента, и давления) является температура, в данной работе разработаны аналитические модели для инженерных расчетов средней температуры, температурного градиента при сварке с учетом неравномерного обтекания.

Энергетический баланс трения пары «запечник – свариваемые объекты» при СТП имеет вид:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

где Q – общий тепловой поток трения; Q_1, Q_2 – тепловые потоки генерируемые в запечник и в свариваемые объекты, учитывая, что:

$$\begin{aligned} Q &= fPvt; \\ Q_1 &= Ah_1\rho_1c_1T_1; \\ Q_2 &= Ah_2\rho_2c_2T_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) с учетом равенства температур и определения глубин распространения теплового потока в запечник и в свариваемые металлы по формулам:

$$h_1 = 2\sqrt{\frac{\lambda_1}{c_1\rho_1}}t; \quad \text{и} \quad h_2 = 2\sqrt{\frac{\lambda_2}{c_2\rho_2}}t, \text{ окончательно}$$

получаем:

$$T = \frac{fPv\sqrt{t}}{2(\sqrt{\lambda_1c_1\rho_1} + \sqrt{\lambda_2c_2\rho_2})}. \quad (3)$$

Для пина который сдвигает и перемешивает свариваемые материалы имеем:

$$T = \frac{\tau v\sqrt{t}}{2(\sqrt{\lambda_1c_1\rho_1} + \sqrt{\lambda_2c_2\rho_2})}, \quad (4)$$

где λ_1, c_1, ρ_1 и λ_2, c_2, ρ_2 – теплопроводность, теплоемкость, плотность инструмента и свариваемых объектов соответственно; τ – напряжения сдвига; v – результирующая скорость; t – время.

Зависимости (3) и (4) позволяют проводить оценку средней температуры СТП. Для более точного определения температуры и градиента температуры по глубине и времени необходимо решать дифференциальные уравнения отдельно для пар трения «запечник – свариваемые объекты» и «пин – свариваемые объекты».

Дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных при начальных и граничных условиях (5), (6), (7), (8) решалось операционным исчислением с учетом неодинаковых обтеканий свариваемыми материалами инструмента, т. е. набегающего и отстающего течений материалов (см. рис. 5):

– для запечника:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (5)$$

при $t = 0; T = 0;$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(1 - \alpha_{\text{ТП}}) f P v}{A}, \quad (6)$$

при $z \rightarrow \infty; T = 0$.

– для конического пина:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (7)$$

при $t = 0; T = 0$;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(1 - \alpha_{\text{ТП}}) \tau v \left(1 - \frac{z}{H}\right)}{A}, \quad (8)$$

при $z \rightarrow \infty; T = 0$.

Для расчета температуры набегающего течения металла под заплечиком получено:

$$T(z, t) = \frac{(1 - \alpha_{\text{ТП}}) f P \sqrt{v_{\text{вп}}^2 + v_{\text{св}}^2}}{A \lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{r}{R}\right) 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right), \quad (9)$$

где P – нормальная сила; t – время; z – координата; H – высота пина; R – радиус заплечика; f – коэффициент трения; r – текущее значение радиуса; $\alpha_{\text{ТП}}$ – коэффициент распределения тепловых потоков.

Для отстающего течения металла под заплечиком (результатирующая скорость выражается через корень из разности квадратов скоростей вращения и перемещения):

$$T(z, t) = \frac{(1 - \alpha_{\text{ТП}}) f P \sqrt{v_{\text{вп}}^2 - v_{\text{св}}^2}}{A \lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{r}{R}\right) 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right).$$

Для расчета температуры набегающего течения металла вокруг пина полученная формула, будет иметь вид:

$$T(x, t) = \frac{(1 - \alpha_{\text{ТП}}) \tau \sqrt{v_{\text{вп}}^2 + v_{\text{св}}^2}}{\lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{z}{H}\right) 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right). \quad (10)$$

Для расчета температуры отстающего течения вокруг пина следует использовать следующую формулу:

$$T(x, t) = \frac{(1 - \alpha_{\text{ТП}}) \tau \sqrt{v_{\text{вп}}^2 - v_{\text{св}}^2}}{\lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{z}{H}\right) 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right),$$

где τ – напряжения сдвига; $v_{\text{вп}}^2, v_{\text{св}}^2$ – скорость вращения и скорость сварки.

Заключение

Предложены аналитические зависимости для проведения инженерных теплофизических расчетов, по которым можно проводить оптимизацию температурных режимов сварки при СТП обратным путем, т. е. подставляя полученную экспериментальным путем оптимальную температуру (например 480 °С при сварке алюминия с алюминием) в формулы и определяя по ним рациональные значения скорости сварки и давления при неодинаковом обтекании инструмента материалом.

С помощью решения методом пластического течения дифференциальных уравнений механики сплошной среды в цилиндрических координатах при соответствующих начальных и граничных условиях численно получены данные скоростей течения и температуры. Представленный подход позволит конструкторам и технологам формировать рекомендации для разработки оптимальных режимов СТП для конкретных материалов и соединений, а также для разработки инструмента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Варочко А.Г., Кузнецов С.В., Половцев В.А., Саратов Н.Н., Прохорович В.Е., Быченко В.А. История становления и перспективы развития технологии сварки трением с перемешиванием в АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» // Технология машиностроения. 2021. № 4. С. 16–41.
2. Овчинников В.В., Дриц А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al–Mg // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 3 (93). С. 7–20.
3. Дрен А.М., Овчинников В.В., Бокашаев В.А. Критерии выбора параметров режима сварки плавлением и трением с перемешиванием тонких листов из алюминиевого сплава 1565 // Цветные металлы. 2018. № 8 (86) С. 3–10.
4. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Анализ инородных включений при сварке трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. 260 с.

5. **Албагачиев А.Ю., Усов П.П.** Численное моделирование переноса тепла при сварке трением с перемешиванием // Проблемы машиностроения автоматизации. 2022. № 3. С. 88–93.

6. **Nandan R., Roy G. G., Lienert T. J., DebRoy T.** Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel // Science and Technology of Welding and Joining. 2006. Vol. 11. no 5. pp. 526–537.

7. **Албагачиев А.Ю.** Моделирование контактных явлений при сварке трением с перемешиванием // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли. Сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей. Брянск, 2022. С. 11–15.

8. **Албагачиев А.Ю., Прохорович В.Е.** Теоретический анализ сварки трением с перемешиванием // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды VII Международной научной конференции. 2021. С. 15–18.

REFERENCES

1. **Brewhko A.G., Kuznetsov S.V., Polovtsev V.A., Saratov N.N., Prokhorovich V.E., Bychenok V.A.** The history of the evolvement and future development of friction stir welding technology in JSC «Khrunichev State Scientific Research Center» / Technology of Mechanical Engineering, 2021, no. 4. pp. 16–41.

2. **Ovchinnikov V.V., Drits A.M.** Technological peculiarities of friction welding with aluminum and magnesium alloys stir / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 3 (93). pp. 1–16.

3. **Dren A.M., Ovchinnikov V.V., Bokashaev V.A.** Criteria for choice of parameters of friction stir welding of thin aluminium sheets 1565 // Nonferrous metals, 2018, no. 8 (86) pp. 3–10.

4. **Rubtsov V.E., Tarasov S.Yu., Kolubaev E.A.** Study of foreign inclusions in friction stir welding / Modern problems of science and education, 2014, no. 5. 260 p.

5. **Albagachiev A.Yu., Usov P.P.** Numerical simulation of heat transfer during friction stir welding / Problems of automatization mechanical engineering, 2022, no. 3. pp. 88–93.

6. **Nandan R., Roy G. G., Lienert T. J., DebRoy T.** Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel // Science and Technology of Welding and Joining, 2006, vol. 11, no 5, pp. 526–537.

7. **Albagachiev A.Yu.** Technological support and improvement of the quality of machine-building and aerospace industry products. Collection of scientific articles of the 14th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists, Bryansk, 2022. pp. 11.

8. **Albagachiev A.Yu. Prokhorovich V.E.** Theoretical analysis of friction stir welding. // Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering. Proceedings of the VII International Scientific Conference, 2021, pp. 15–18.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 06.03.2023.

The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 28.02.2023; assepted for publication 06.03.2023.

