

УДК 519.876.5

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ WeRTSim ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ

А.В. Масленников, И.В. Дикшев, М.С. Медведков (Москва), В.А. Ерофеев (Тула)

Введение

В нашей статье «Компьютерная система имитационного моделирования *WeRTSim* для инженерного анализа сварки и родственных технологий», содержащейся в этом сборнике, описан отечественный CAE-продукт поддержки проектирования технологии высокотемпературных процессов сварочных и родственных технологий, разработанный и развиваемый российской компанией АО «Юмосс». В статье отмечены его конкурентные преимущества, расширяемые модульная структура и базы данных материалов. Описаны принципы имитационного моделирования, на которых строится продукт.

В данной работе, на примере нескольких видов сварочных процессов, представлено применение CAE *WeRTSim* для решения некоторых типовых технологических задач, возникающих в процессе проектирования (анализа) новой или эксплуатации уже существующей сварочной технологии [1].

1. GMAW-процесс

GMAW (Gas metal arc welding) – процесс представляет собой сварочную технологию, в которой соединение металлических элементов производится электрической дугой, горячей между плавящийся электродной проволокой и поверхностью свариваемых деталей, рис. 1. При этом электродный металл каплями переносится с плавящегося конца электродной проволоки через дуговой промежуток в расплавленный металл [2].

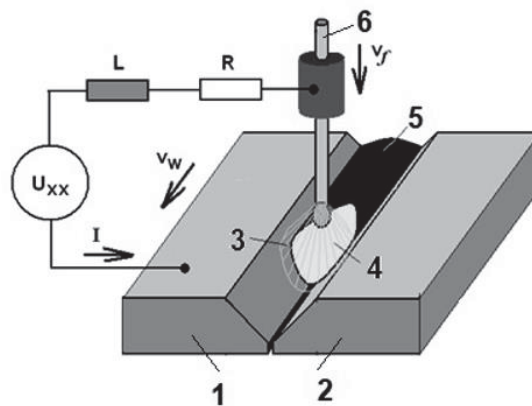


Рис. 1. Схематичное представление сварки плавлением

1 – первая свариваемая деталь, 2 – вторая свариваемая деталь, 3 – электрическая дуга, 4 – сварочная ванна, 5 – сварной шов, 6 – электродная проволока; U_{XX} -L-R – сварочная электрическая цепь, I – сварочный ток, v_w – скорость сварки, v_f – скорость подачи электродной проволоки

1.1. Расчёт параметров режима сварки

Одной из первых задач, возникающих при проектировании технологии, является подбор параметров режима, при которых обеспечивается оптимальное заполнение разделки кромок при минимальном количестве сварочных проходов. При этом размеры результирующего сварного шва должны лежать в пределах, оговоренных соответствующим нормативным документом.

Задача: рассчитать параметры режима сварки (с раскладкой валиков) нестандартного таврового соединения (рис. 2), с толщинами элементов $16.0 + 12.0$ мм, из стали 09Г2С. Пространственное положение сварки – потолочное, защитный газ 82%Ar + 18%CO₂, электродная проволока Св08Г2С диаметром 1.2 мм, вылет электродной проволоки 12.0 мм.

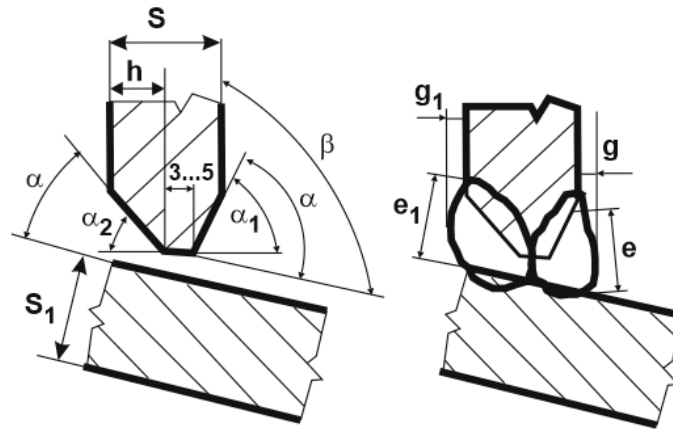


Рис. 2. Тавровое соединение

$S_1 = 12,0$ мм, $S = 16,0$ мм, $\beta = 110^\circ$, $\alpha = 45^\circ \pm 2^\circ$, $\alpha_1 = 25^\circ$, $\alpha_2 = 65^\circ$,
 $b = 2,0 \pm 2,0$ мм, $h = 7,5$ мм. Требования к размерам шва:
 $e = 12,0 \pm 2,0$ мм, $e_1 = 16,0 \pm 2,0$ мм, $g = 4,0 \pm 2,0$ мм, $g_1 = 10,0 \pm 2,0$ мм

Решение

На первом этапе после ввода комбинации входных параметров запускается пресолвер (модуль системы WeRTSim) для формирования разделки кромок под сварку, расчёта количества валиков и их раскладки в разделке, отдельно для лицевой и обратной (при наличии) сторон, рис. 3.



Рис. 3. Схема раскладки швов – всего три шва
 а) – два на лицевой стороне; б) – один на обратной

В результате было определено общее количество валиков равное трём, с раскладкой по формуле – два на лицевой части разделки, один – на обратной стороне.

На втором этапе после определения конфигурации разделки кромок и пространства моделирования (см. рис. 3) запускается ещё один пресолвер (модуль системы WeRTSim) для расчёта (ввода / корректировки) параметров режима сварки, которые представляют собой набор типовых параметров, задаваемых (показываемых) сварщиком на реальной сварочной установке (источнике питания).

Таблица 1¹. Рассчитанные параметры режима для лицевой стороны соединения

№ слоя	№ прохода	Δ , см	A, см	Tk, с	v_w , см/с	v_{el} , см/с	U, В	I, А
1	1	0.00	0.00	0.00	0.50	7.03	22.13	176.14
2	2	0.22	0.24	0.97	0.50	9.29	21.59	220.10

Таблица 2. Рассчитанные параметры режима для обратной стороны соединения

№ слоя	№ прохода	Δ , см	A, см	Tk, с	v_w , см/с	v_{el} , см/с	U, В	I, А
1	1	0.00	0.00	0.00	0.75	12.65	22.05	272.59

1.2. Расширенный термодинамический анализ процесса

На третьем этапе запускается солвер (расчётный модуль системы *WeRTSim*) для численного моделирования, осуществляющий расчёт термодинамического состояния на основе рассчитанных (заданных) параметров режима и определения некоторых характеристик качества сварного соединения, рис. 4 - 8.

Качество многопроходной сварки стали оценивается: геометрией зоны затвердевшего металла на поперечном сечении сварного соединения или шва; временем охлаждения с 850 °С до 500 °С; структурой металла (процентным содержанием мартенсита, бейнита, перлита и феррита), определяемых по скорости охлаждения и химическому составу стали; напряжённому состоянию металла и накопленной пластической деформацией, определяемых по термодинамическим циклам металла при моделировании формирования проходов; значениям перемещений металла, усадочных сил и изгибающих моментов, определяемых по распределению напряжённого состояния и пластической деформации по поперечному сечению шва.

По структуре (фазовому составу) оцениваются прочностные свойства металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Напряжения и деформации рассчитываются для каждого прохода и суммируются. В результате расчёта напряжений и деформаций металла шва и ЗТВ определяется накопленная пластическая деформация (при сварке многопроходного шва), общее напряжённое состояние по критерию Мизеса, а также усадочные силы вдоль и поперёк шва, поперечная усадка, продольный и поперечный изгибающие моменты, угловая деформация.

¹ Δ – поперечное смещение электрода от центра стыка (разделки), A – амплитуда колебаний электрода, Tk – период колебаний электрода, v_w – скорость сварки, v_{el} – скорость подачи электродной проволоки, U – установленное напряжение на источнике питания, I – сварочный ток

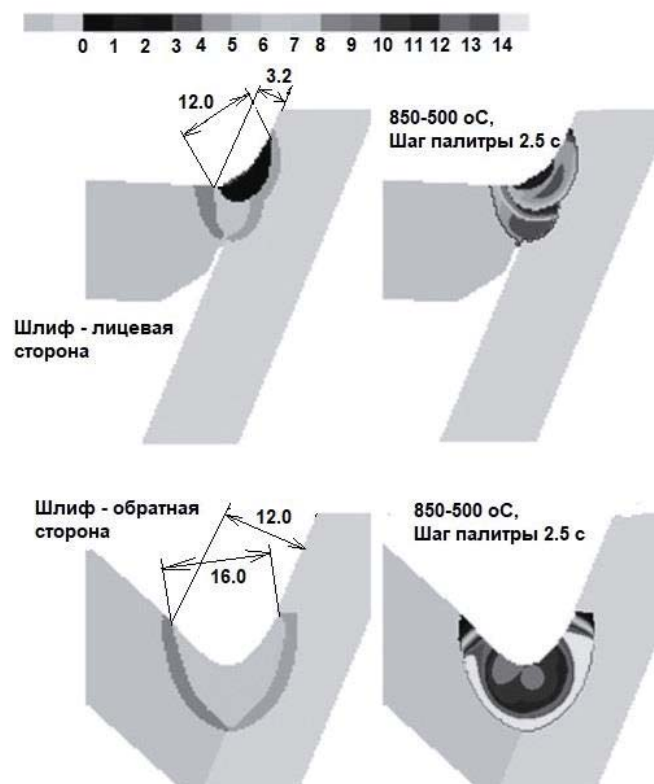


Рис. 4. Результирующий сварной шов с рассчитанным полем времени охлаждения с 850 °С до 500 °С для лицевой и обратной сторон разделки

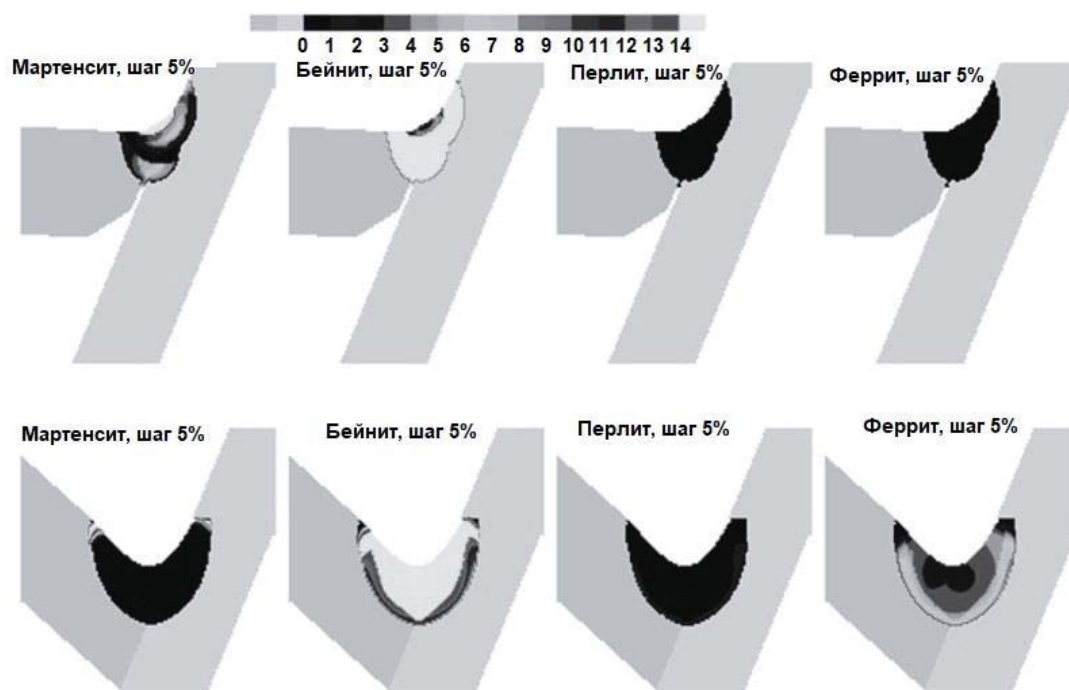


Рис. 5. Результирующий сварной шов с рассчитанными полями фазового состава для лицевой и обратной сторон разделки

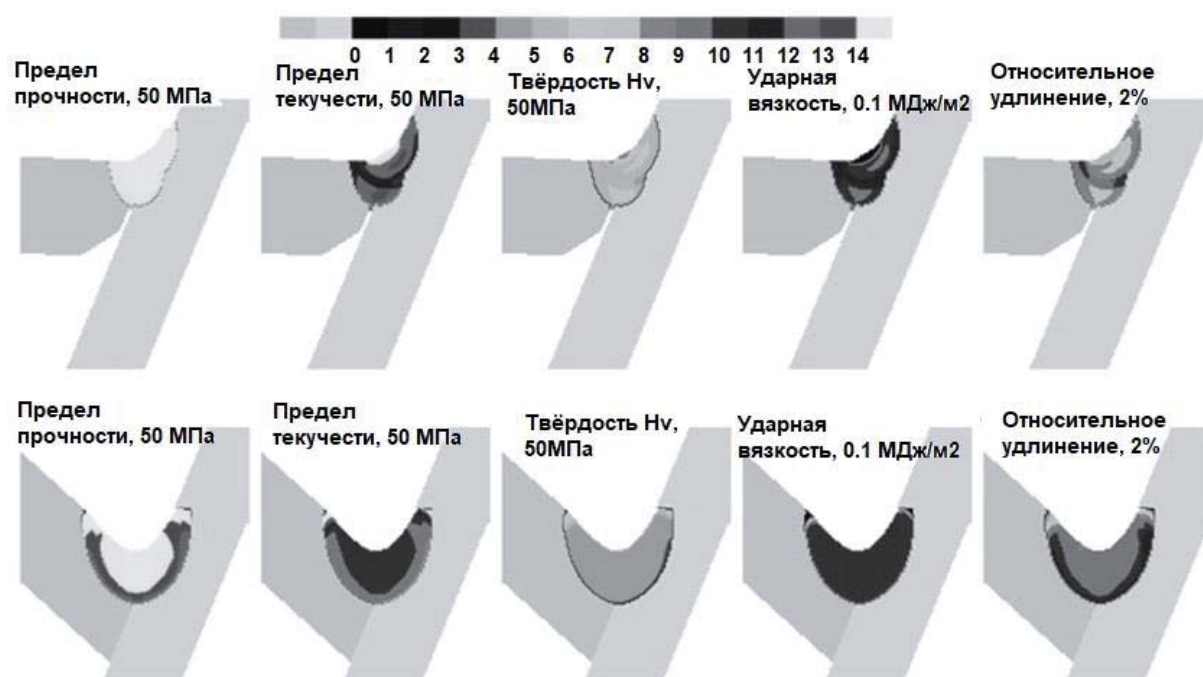


Рис. 6. Результирующий сварной шов с рассчитанными полями значений механических характеристик для лицевой и обратной сторон разделки

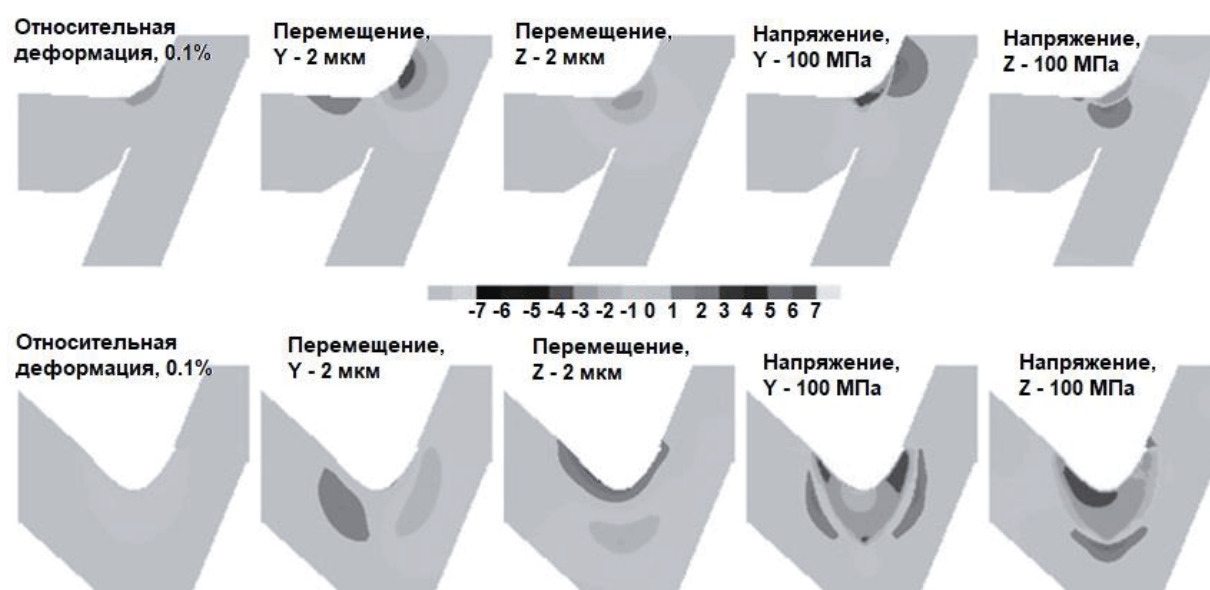


Рис. 7. Результирующий сварной шов с рассчитанными полями значений деформаций и напряжений для лицевой и обратной сторон разделки

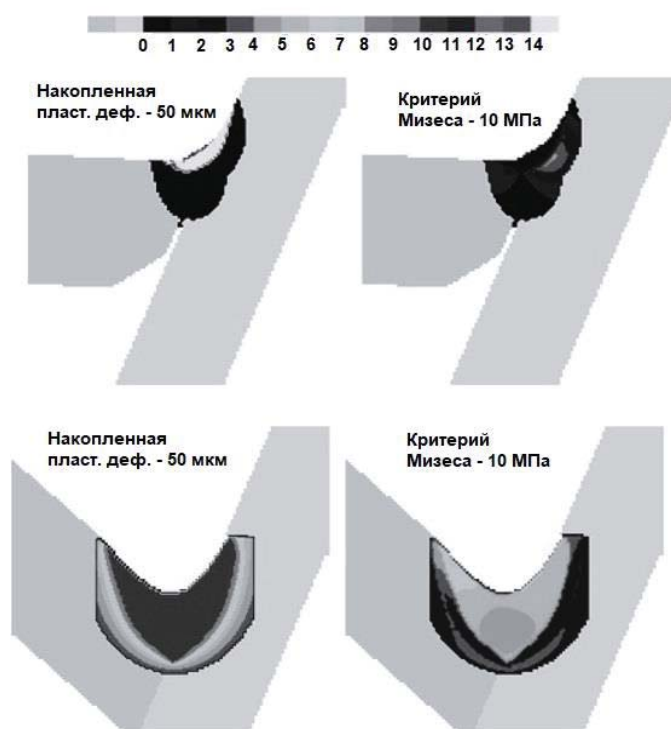


Рис. 8. Результирующий сварной шов с рассчитанными полями накопленной пластической деформации и значениями критерия Мизеса для лицевой и обратной сторон разделки

2. FSW-процесс

FSW (friction stir welding) – термомеханический процесс соединения материалов в пластическом состоянии (ниже температуры плавления), при котором источником энергии является трение поверхностей вращающегося и перемещающегося специального инструмента о поверхности металла соединяемых деталей, а также объёмное вязкостное трение, рис. 9.

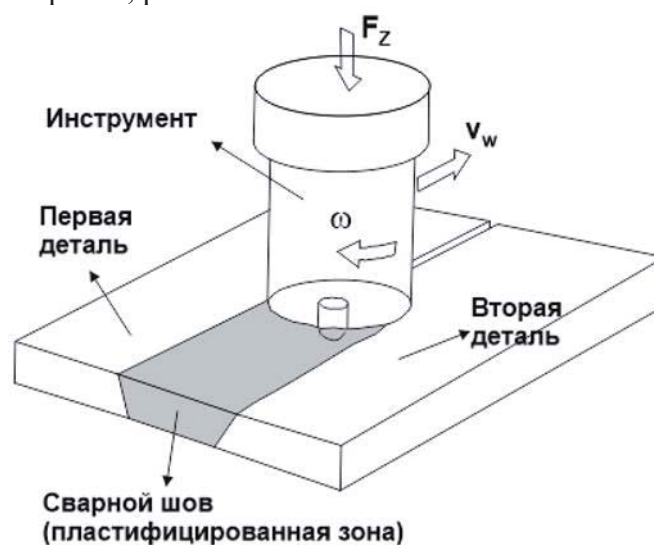


Рис. 9. Схема FSW-процесса и основные параметры режима
 F_z – усилие прижатия инструмента, v_w – линейная скорость перемещения инструмента,
 ω – угловая скорость вращения инструмента

Металл, нагреваясь трением инструмента, переходит в вязкопластичное состояние вблизи контактной поверхности инструмента, и, перемещиваясь, образует позади инструмента сварной шов. Особенностью реализации FSW-процесса является перепад давлений в вязкопластичном материале впереди и позади инструмента. При неоптимальном выборе комбинации параметров режима (F_z, v_w, ω) последнее обстоятельство приводит к тому, что в задней части вращающегося и перемещающегося инструмента, в непосредственной близости от контакта «инструмент-вязкий материал», возникает зона растягивающих напряжений. При их превышении предела прочности сплава (при данной температуре и скорости деформации) образуются разрывы материала – появляется распространённый дефект в форме полости.

Основой модели FSW в CAE *WeRTSim* является уравнение энергии (учитывающее температурные зависимости теплопроводности и энтальпии свариваемого сплава) и уравнение Навье-Стокса для вязкой несжимаемой среды (учитывающее динамическую вязкость сплава $\eta(T, \dot{\epsilon})$ в зависимости от температуры и скорости деформирования) [3]. Распределение интенсивности тепловыделения описывается при учёте предела прочности сплава при сдвиге $\tau(T, \dot{\epsilon})$. При определении расположения границы зоны пластической деформации используется зависимость предела прочности сплава $\sigma(T)$ при сжатии (твёрдости) от температуры.

Модель FSW в *WeRTSim* учитывает следующие физические эффекты и явления:

- поверхностное трение в контакте «инструмент – сплав»;
- внутреннее трение в зоне пластической деформации;
- тепловыделение от поверхностного и внутреннего трения;
- молекулярный и трансляционный теплоперенос;
- пластическое течение вокруг инструмента;
- изменение деформационных свойств металла вследствие нагревания и деформирования.

Численное решение уравнений модели позволяет рассчитать поле скоростей вязкопластического течения материала, кинематическое и гидростатическое давления в пластической зоне и, следовательно, спрогнозировать возникновение полостей [4]. Ниже рассмотрены некоторые частные задачи по оценке влияния основных параметров режима FSW на качество сварного шва.

2.1. Оценка влияния скорости вращения инструмента

Задача: оценить возможность появления дефекта в виде полости при FSW-сварке алюминиевого сплава в зависимости от угловой скорости вращения инструмента. Сварка листов толщиной 4 мм при усилии прижима инструмента $F_z = 12$ кН, частоте вращения инструмента $\omega = 300$ и 800 об./мин и скорости подачи инструмента $v_w = 0,15$ м/мин. Инструмент имел конический штифт с диаметром основания 5 мм, диаметром конца 3,6 мм, длиной 3,7 мм. Диаметр рабочего торца тела инструмента – 13 мм, рис. 10.

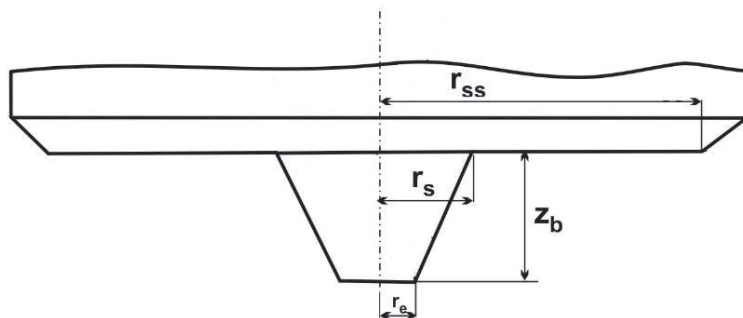


Рис. 10. Схематичное изображение рабочего инструмента FSW

$r_{ss} = 13$ мм, $r_s = 5$ мм, $r_e = 4$ мм, $z_b = 3.7$ мм

Решение

Было проведено имитационное моделирование процесса в *WeRTSim* при указанной выше комбинации параметров (F_z, v_w, ω). Варьировали частоту вращения инструмента ω от минимального до максимального значений.

В результате получены семейства расчётных макрошлифов с показателями качества формирования шва, рис. 11-13.

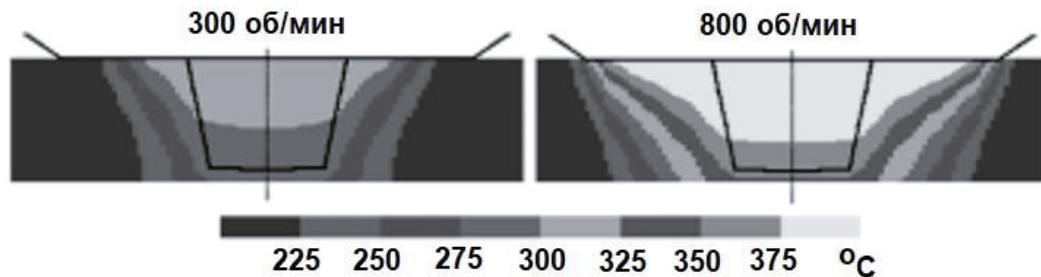


Рис. 11. Распределение температуры при минимальном и максимальном значении ω

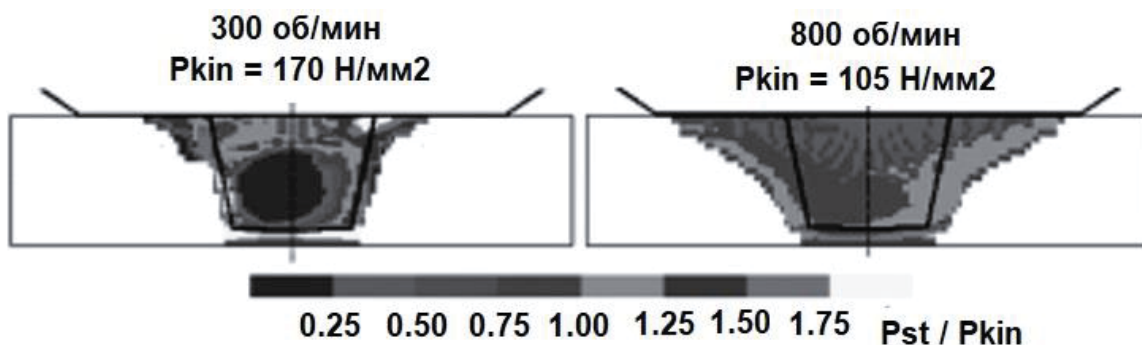


Рис. 12. Распределение относительного давления на границе зоны пластического течения позади инструмента при минимальном и максимальном значении ω



Рис. 13. Строение поперечного сечения шва при минимальном и максимальном значении ω

Установлено, что увеличение частоты вращения инструмента вызывает увеличение мощности тепловыделения. Температура металла увеличивается и его прочность уменьшается (см. рис. 11). Вследствие низкой температуры при малой частоте вращения инструмента металл имеет высокую прочность и давление в зоне деформирования велико. При увеличении ω давление снижается (см. рис. 12). Причём давление распределено неравномерно, что более заметно при малых частотах вращения, при которых позади штифта возникает зона с растягивающими напряжениями, в которой могут возникать пустоты (см. рис. 13). С увеличением частоты эта зона исчезает.

2.2. Оценка влияния усилия прижима инструмента

Задача: оценить возможность появления дефекта в виде полости при FSW-сварке алюминиевого сплава в зависимости от усилия прижима инструмента. Сварка листов толщиной 4 мм при усилии прижима инструмента $F_z = 8$ и 18 кН, частоте вращения инструмента $\omega = 550$ об./мин и скорости подачи инструмента $v_w = 0,15$ м/мин.

Решение

Было проведено имитационное моделирование процесса в *WeRTSim* при указанной выше комбинации параметров (F_z, v_w, ω). Варьировали усилие прижима инструмента F_z от минимального до максимального значений.

В результате получены семейства расчётных макрошлифов с показателями качества формирования шва, рис. 14-16.

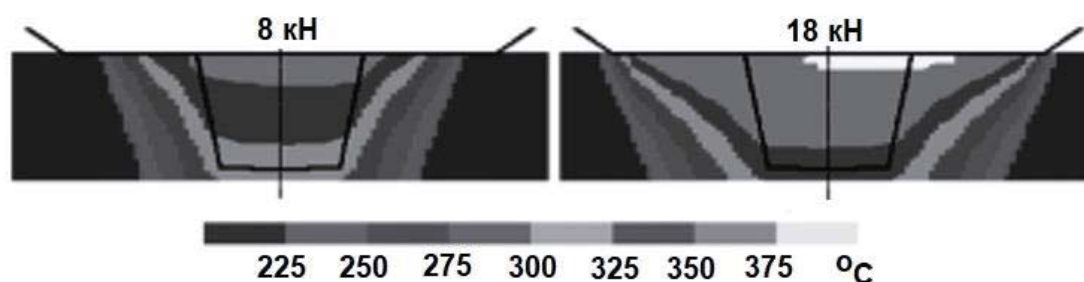


Рис. 14. Распределение температуры при минимальном и максимальном значении F_z

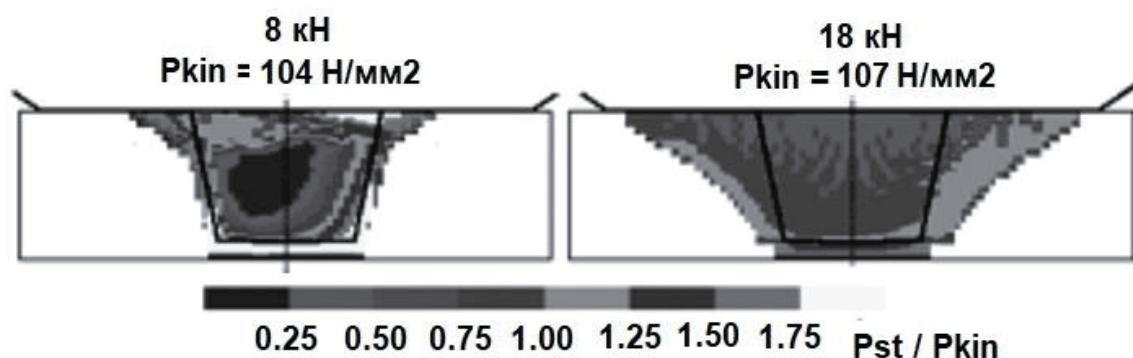


Рис. 15. Распределение относительного давления на границе зоны пластического течения позади инструмента при минимальном и максимальном значении F_z

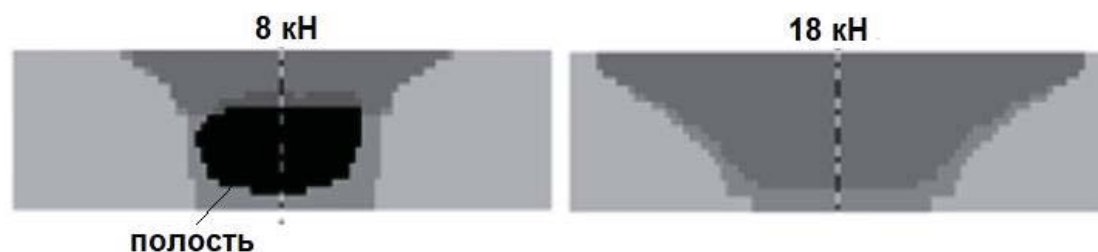


Рис. 16. Строение поперечного сечения шва при минимальном и максимальном значении F_z

Установлено, что при малом усилии прижима площадь контакта тела инструмента с листами и мощность тепловыделения недостаточны для нагревания. При увеличении силы прижима мощность и температура увеличиваются, пока контакт не достигнет диаметра тела инструмента (см. рис. 14). Зона пластического течения выходит

из-под инструмента, что уменьшает мощность. При увеличении силы прижима объём зоны деформирования сильно увеличивается. Относительное давление в зоне деформирования немного увеличивается (см. рис. 15). При малых значениях усилия прижима велико влияние кинематической (сдвиговой) составляющей давления, которая позади штифта изменяет напряжение до растягивающих значений. Поэтому при малых усилиях прижима возможно возникновение пустот (см. рис. 16).

2.3. Оценка влияния скорости подачи инструмента

Задача: оценить возможность появления дефекта в виде полости при FSW-сварке алюминиевого сплава в зависимости от скорости подачи инструмента. Сварка листов толщиной 4 мм при усилии прижима инструмента $F_z = 14$ кН, частоте вращения инструмента $\omega = 550$ об./мин и скорости подачи инструмента $v_w = 0,05$ и $0,25$ м/мин.

Решение

Было проведено имитационное моделирование процесса в *WeRTSim* при указанной выше комбинации параметров (F_z, v_w, ω). Варьировали скорость подачи инструмента v_w от минимального до максимального значений.

В результате получены семейства расчётных макрошлифов с показателями качества формирования шва в зависимости от значения скорости подачи инструмента, рис. 17-19.

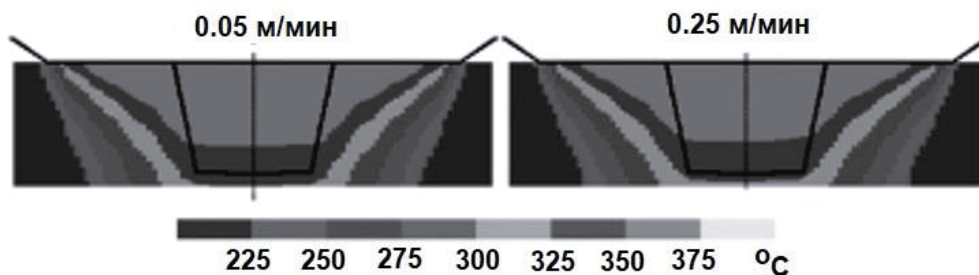


Рис. 17. Распределение температуры при минимальном и максимальном значении v_w

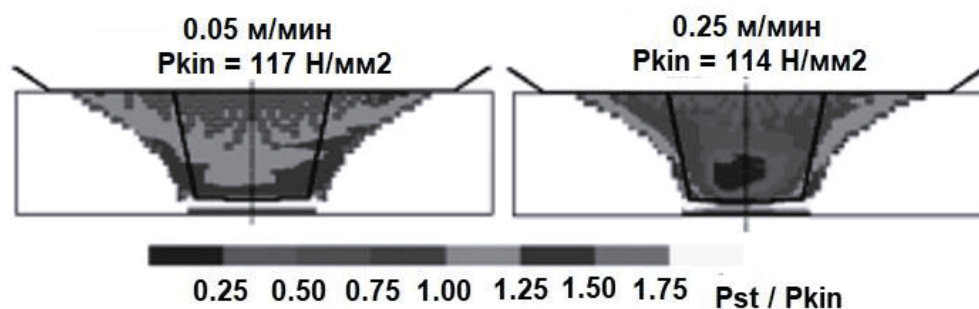


Рис. 18. Распределение относительного давления на границе зоны пластического течения позади инструмента при минимальном и максимальном значении v_w



Рис. 19. Строение поперечного сечения шва при минимальном и максимальном значении v_w

Установлено, что при увеличении линейной скорости сварки v_w температура в зоне деформирования незначительно уменьшается (см. рис. 17). Среднее давление почти не изменяется, но различие давлений возрастают значительно (см. рис. 18). При этом наблюдается существенное увеличение в различии давлений перед и позади штифта. При больших скоростях v_w подачи это давление уменьшается, и в этой зоне появляются растягивающие напряжения и, как следствие – пустоты (см. рис. 19).

3. Заключение

Имитационное моделирование, основанное на численных методах, позволяет решать многие типовые задачи проектирования (анализа) технологии сварки, что и было показано выше на примерах сварки плавлением и сварки трением с перемешиванием.

Точность имитационного моделирования обеспечивается калибровкой математических моделей под каждое конкретное используемое сварочное оборудование, свариваемые и расходные материалы. Результаты, иллюстрирующие статью, получены с помощью базовых моделей *WeRTSim* (в данном случае GMAW и FSW) и теоретических значений параметров оборудования и свойств материалов из открытых источников, однако видна общая тенденция поведения процесса при варьировании исходных данных.

Разнообразие форм представления результатов в постпроцессоре (модуль системы *WeRTSim*) позволяет быстро и эффективно принимать решения по объекту исследования и его параметрам. Имеется возможность визуализации в 2D (продольные и поперечные сечения, макрошлифы) и 3D, построения графиков термоциклов, расчёта параметров эквивалентного источника теплоты и формирования различных протоколов.

Литература

1. **Simon W. Miller, Daniel A. Finke, Michael Kupinski, Christopher B. Ligetti**, WeldANA: Welding decision support tool for conceptual design, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 51, 2019, P. 120-131, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.007>.
2. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 702 с.
3. **Reisgen U, Schiebahn A, Sharma R., Maslennikov A, Rabe P, Erofeev V.** A method for evaluating dynamic viscosity of alloys during friction stir welding. *Journal of Advanced Joining Processes* 2020; 1: <https://doi.org/10.1016/J.JAJP.2019.100002>.
4. **Масленников А.В., Ерофеев В.А.** Физико-математическая модель сварки трением с перемешиванием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 10. С. 64-73.