

УДК 621.791.011

doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-12-20

Компьютерное моделирование тепловых процессов при дуговой сварке толстостенных конструкций из алюминиевых сплавов

С.А. Королев¹, А.Е. Зимаков²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Мосэнерго» (ПАО «Мосэнерго»)

Computer Simulation of Thermal Processes in Arc Welding of Thick-Walled Aluminum Alloy Structures

S.A. Korolev¹, A.E. Zimakov²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² PAO Mosenergo

Проведено компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих при сварке толстостенной конструкции из широко распространенного в современной промышленности алюминиево-магниевого сплава АМг6. При моделировании учтены особенности, связанные с интенсивным отводом тепла из зоны сварки, вызванным значительными габаритными размерами сварной конструкции и высокой теплопроводностью используемого материала. На практике указанные особенности увеличивают вероятность образования такого дефекта, как несплавление сварного шва с основным металлом соединяемых элементов. Моделирование выполнено методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Разработана геометрическая модель, проведено разбиение тел на конечные элементы. Для областей с ожидаемым высокими градиентами температур конечные элементы выбраны значительно меньшего размера, чем таковые в отдаленных от зоны сварки частях геометрической модели. Это увеличило точность решения и значительно снизило время расчетов. Модель источника нагрева построена с учетом постепенного появления наплавленного металла сварного шва по мере перемещения сварочной дуги вдоль соединяемых кромок. Результаты моделирования подтвердили возможность применения имеющихся справочных режимов сварки для исследуемых условий.

Ключевые слова: сварка алюминиевых сплавов, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, тепловые процессы при сварке

This paper presents the results of computer simulation of the thermal processes occurring during welding of thick-walled structures made of the AMg6 aluminium-magnesium alloy, widely used in modern industry. The model takes into account features associated with intensive heat removal from the welding zone caused by the large overall dimensions of the welded structure and the high thermal conductivity of the material used. In practice, these features increase the probability of formation of such defects as non-fusion of the weld with the base metal of the connected elements. Modeling was performed using the finite element method in the ANSYS software package. A geometric model was developed, and the bodies were divided into finite elements. For the areas with expected high temperature gradients, the finite elements in the geometric model were chosen to be much smaller than those in the areas further away from the welding zone. This increased the accuracy of the solution and significantly reduced the calculation time. The model of the heat source was constructed

taking into account the gradual deposition of the weld metal as the welding arc moved along the connected edges. The simulation results confirmed the possibility of applying the available welding modes for the studied conditions.

Keywords: welding of aluminum alloys, computer modeling, finite element method, thermal processes during welding

Сварка толстостенных конструкций (ТСК) из алюминиевых сплавов имеет ряд особенностей, связанных с интенсивным теплоотводом [1, 2]. Значительный теплоотвод из зоны сварки обусловлен высокой теплопроводностью материала и усугублен большой толщиной стенок [3]. Эти факторы необходимо учитывать при подборе режимов сварки, так как существует большая вероятность несплавления кромок, что для большинства конструкций является недопустимым дефектом.

В связи с этим справочные режимы сварки, рекомендованные для получения сварных швов (СШ) требуемой геометрии, но подобранные для условий, отличных от реальных, нуждаются в дополнительной проверке и уточнении. Это можно сделать только путем сварки натурных полноразмерных образцов, что связано с большими затратами, или на основе компьютерного моделирования.

Цель работы — подтвердить применимость справочных режимов сварки в условиях повышенного теплоотвода с учетом геометрических особенностей изготавливаемой конструкции.

Описание изделия. Технология сварки разработана для ТСК, внешний вид которой приведен на рис. 1.

Сварная ТСК представляет собой две поперечные переборки, соединенные продольно расположенными элементами из прокатного профиля. Толщины свариваемых элементов составляют до 12 мм. Такие конструкции из алюминиевых сплавов относятся к категории толстостенных и являются ответственными, так как их используют в судостроении.

Материал изделия. В качестве материала заготовок выбран алюминиево-магниевый сплав АМг-6, имеющий следующий химический со-

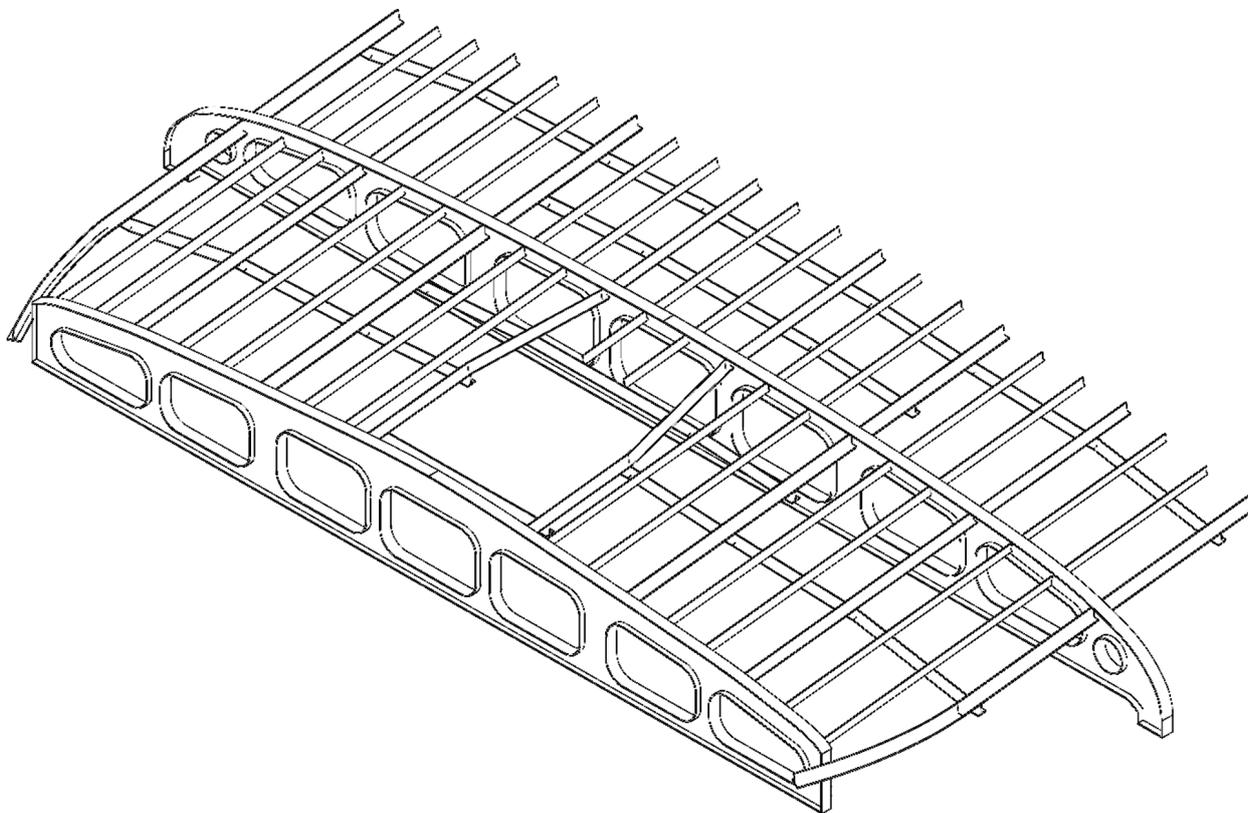


Рис. 1. Внешний вид сварной ТСК

Таблица 1

Значения коэффициента теплопроводности и массовой теплоемкости сплава АМгб при разной температуре

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°С)	Массовая теплоемкость сплава, Дж/(г·°С)
0	1,17	0,850
100	1,22	0,922
400	1,38	1,090
650	1,50	1,230

Таблица 2

Значения коэффициента теплоотдачи в воздух сплава АМгб при разной температуре

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{Вт}/(^\circ\text{C} \cdot \text{мм}^2)$	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{Вт}/(^\circ\text{C} \cdot \text{мм}^2)$	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{Вт}/(^\circ\text{C} \cdot \text{мм}^2)$
0	12	250	242500	500	44
50	14	300	26	550	50
100	16	350	30	600	57
150	18	400	34	650	65
200	20	450	39	700	74

став [4], мас. %: Si — 0,4; Fe — 0,4; Cu — 0,1; Mn — 0,5...0,8; Mg — 5,8...6,8; Zn — 0,2; Ti — 0,02...0,10; Be — 0,0002...0,0005; Al — остальное.

Необходимые для моделирования тепловых процессов при сварке теплофизические свойства (коэффициент теплопроводности, массовая теплоемкость и коэффициент теплоотдачи в воздух α) сплава АМгб при разной температуре T приведены в табл. 1 и 2 [5, 6].

Технология сварки. Для моделирования выбрана механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертных газов. Этот способ обеспечивает высокую производительность процесса и требуемое качество сварных соединений.

В качестве присадочной проволоки использована близкая по химическому составу к основному материалу сварочная проволока СвАМгб1 [7], а в качестве защитного газа — чистый аргон.

Анализ конструкции показал, что для ее изготовления применяют швы типа ТЗ по ГОСТ 14806–80 [8] с катетами 4 (рис. 2, а) и 6 мм (рис. 2, б).

Определение режима сварки. Режимы сварки (табл. 3) подобраны на основе справочных данных [9].

Указанные в табл. 3 режимы являются справочными, поэтому проведена их проверка для учета указанных особенностей рассматриваемых

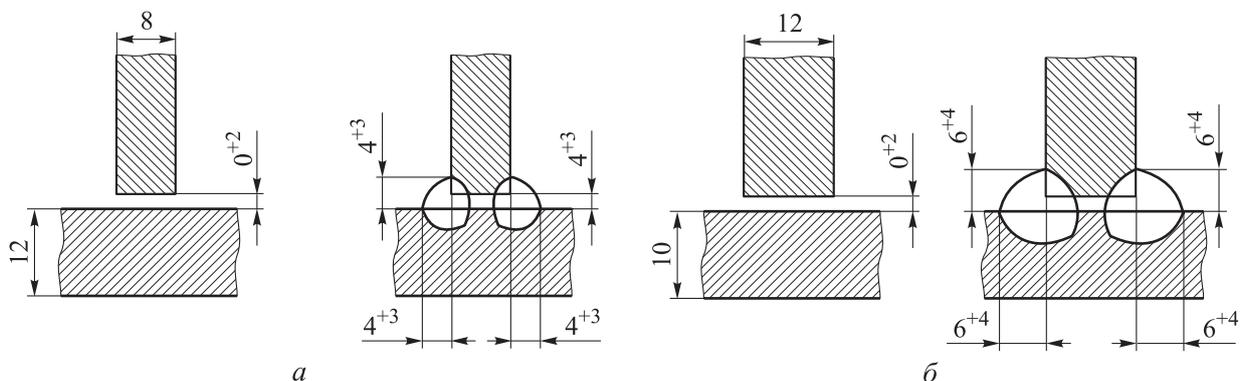


Рис. 2. Эскизы соединения шва типа Т3 по ГОСТ 14806–80 с катетами 4 (а) и по 6 мм (б)

Таблица 3

Режимы сварки

Номинальный катет СШ, мм	Ток сварки, А	Напряжение на дуге, В	Расход защитного газа, л/мин	Диаметр сварочной проволоки, мм
4	200	18	6...10	1,6
6	270	24	8...12	2,0

Таблица 4

Значения площади поперечного сечения СШ с учетом допусков

Катет СШ по ГОСТ 14806–80, мм	Площадь, мм ²	
	Минимальная	Максимальная
4 ⁺³	8	24,5
6 ⁺⁴	18	50,0

Таблица 5

Расчетные значения скорости сварки

Катет СШ, мм	Скорость сварки, м/ч	
	Максимальная	Минимальная
4 ⁺³	75,75 (для площади 8 мм ²)	24,7 (для площади 24,5 мм ²)
6 ⁺⁴	45,45 (для площади 18 мм ²)	16,36 (для площади 50 мм ²)

мой ТСК и геометрических размеров СШ с учетом допусков.

Минимальная и максимальная площади поперечного сечения СШ с учетом допусков приведены в табл. 4.

Для указанных в табл. 3 значений тока и среднего напряжения на дуге определены расчетные скорости сварки, обеспечивающие получение СШ с площадями поперечного сечения, рассчитанными с учетом допусков на катеты угловых СШ.

Скорость сварки

$$v_{св} = \frac{\alpha_n I_{св}}{\rho F_n},$$

где α_n — коэффициент наплавки, $\alpha_n = 8 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{ч})$; $I_{св}$ — ток сварки; ρ — плотность сварочной проволоки, $\rho = 2,7 \text{ г}/\text{см}^3$; F_n — плотность наплавки, см^2 .

Полученные расчетные значения скорости сварки (табл. 5) являются типовыми для выбранного способа.

Учет особенностей сварки ТСК. Для учета особенностей сварки ТСК, приводящих к повышенному теплоотводу, проведена проверка полученных режимов сварки. Такую проверку можно выполнить только путем моделиро-

вания процессов теплопереноса методом конечных элементов [10] с помощью отечественных [11] и зарубежных программных комплексов [12, 13].

Проведено моделирование в программном комплексе ANSYS [14] для СШ с минимальной площадью поперечного сечения, выполняемого с максимальной скоростью сварки. Этот вариант является наиболее неблагоприятным с точки зрения сплавления кромок.

На первом этапе моделирования в среде проектирования «Компас» [15] построена 3D-модель типового сварного узла ТСК (рис. 3).

Типовой узел представляет собой два пересекающихся тавра. Толщина полки равна 12 мм; толщина стенки — 8 мм.

На втором этапе моделирования проведено разбиение 3D-модели типового сварного узла ТСК на конечные элементы (КЭ) (рис. 4).

Угловой СШ и прилегающие к нему зоны основного металла разбивались на КЭ меньшего размера, чем остальная часть конструкции. Это позволило более точно и достоверно определить тепловые поля в зоне с высокими градиентами температур. Разбиение большей части ТСК на КЭ большого размера дало возможность уменьшить общее количество КЭ, что значительно снизило время расчетов.

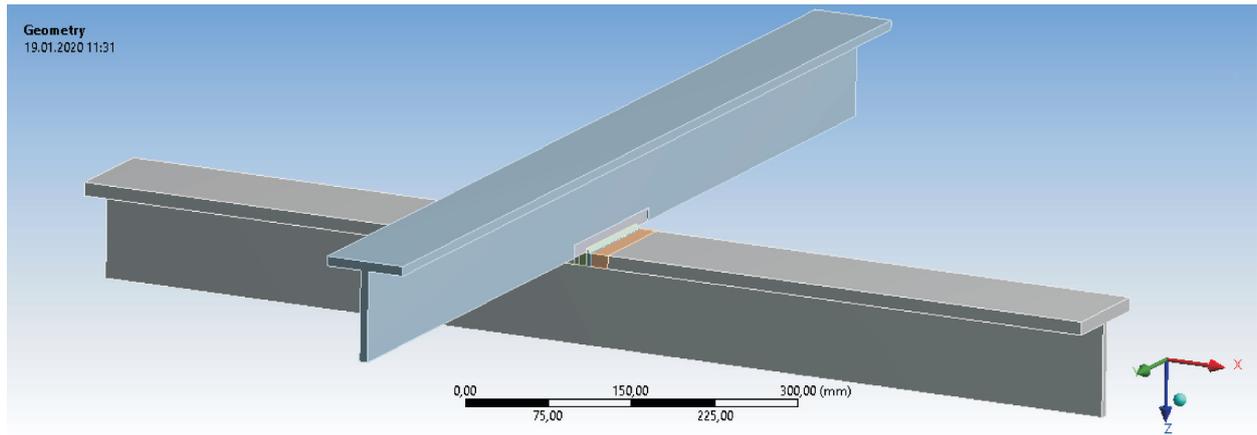


Рис. 3. 3D-модель типового сварного узла ТСК

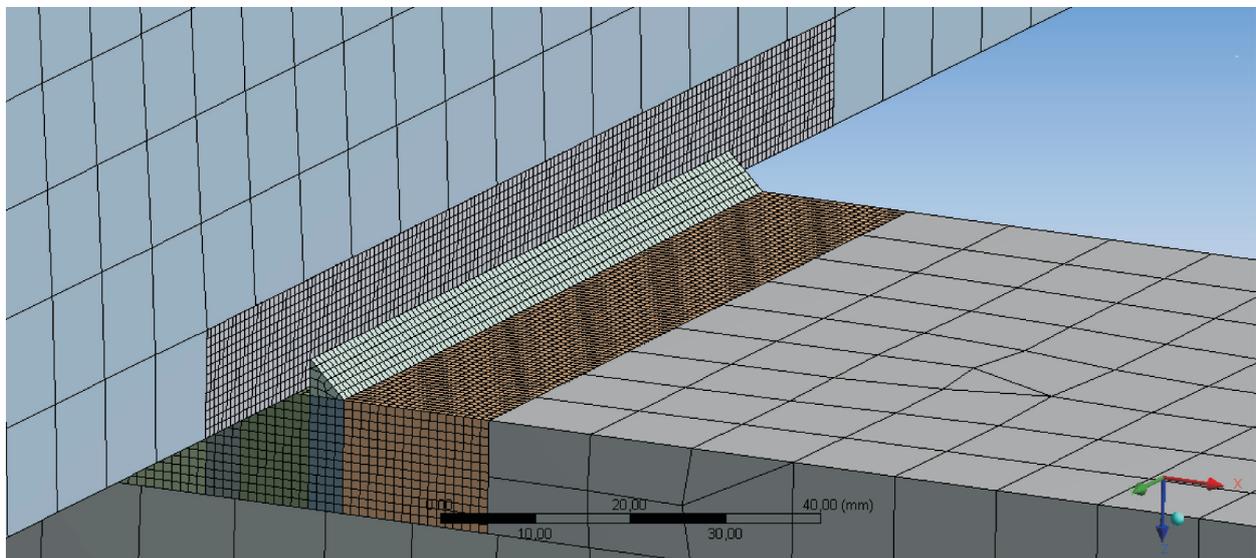


Рис. 4. Разбиение 3D-модели типового сварного узла ТСК на КЭ

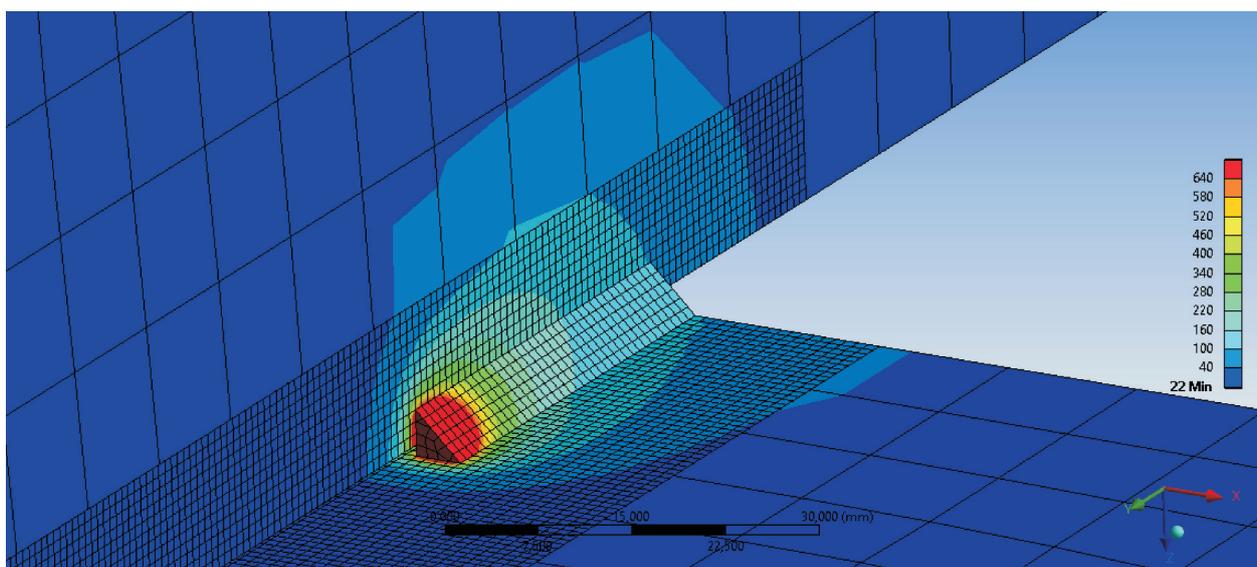


Рис. 5. Пример поля температуры, °С, в сварном узле ТСК в начальный момент сварки

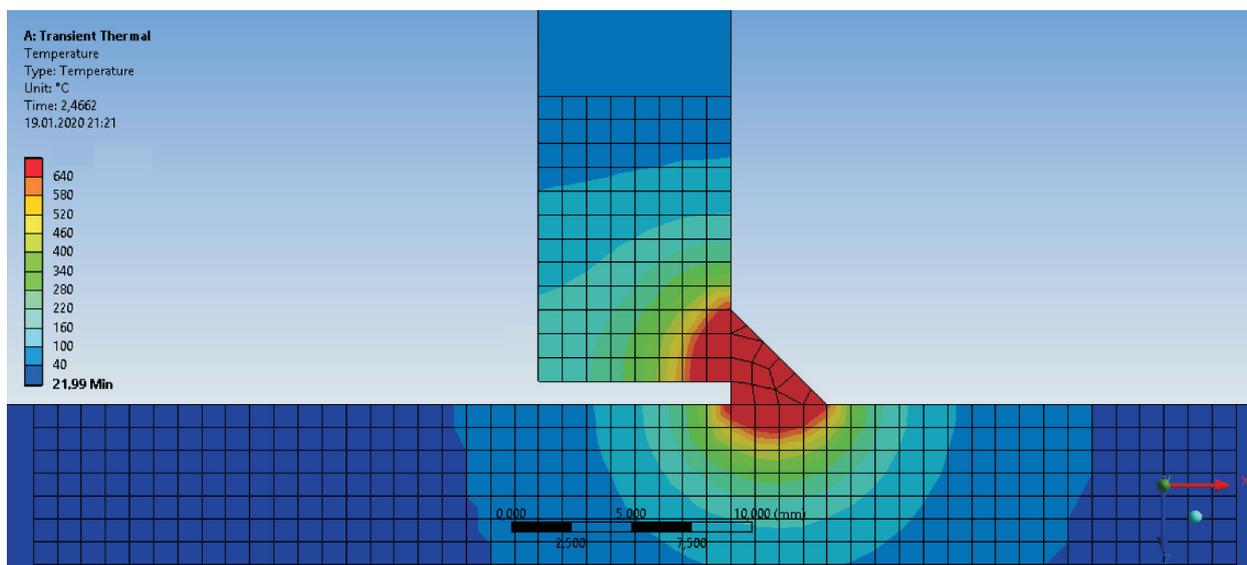
На третьем этапе моделирования задавались граничные условия — конвекция для всех контактирующих с атмосферой поверхностей.

В процессе моделирования учитывалось постепенное появление металла СШ вдоль траектории сварки [16]. Пример поля температуры в сварном узле ТСК в начальный момент сварки приведен на рис. 5.

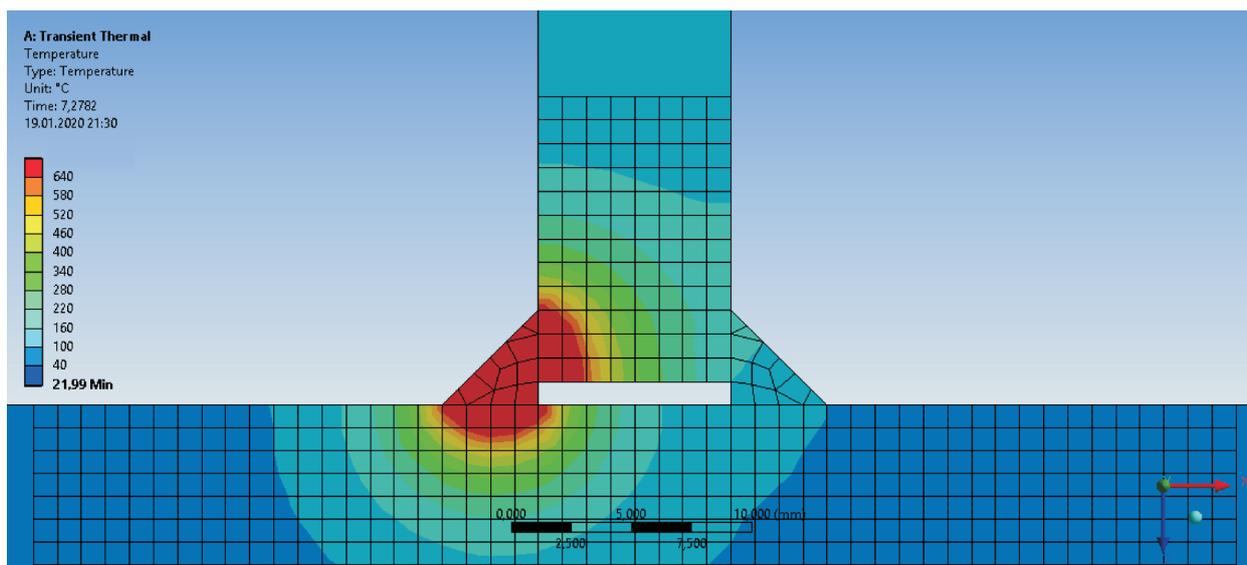
Распределения температур в поперечных сечениях СШ, по которым можно судить о зонах проплавления, при выполнении первого и второго проходов приведены на рис. 6, а и б соот-

ветственно. Здесь видно, что в область, нагретую выше температуры плавления (640 °С), обозначенную красным цветом, попадает основной металл по всей протяженности катетов углового СШ.

Указанную область можно считать сварочной ванной. На основании этого можно сделать вывод, что сплавление обеспечено. Максимальная температура, полученная во время расчета, не превышала температуру испарения алюминия, что также подтверждает правильность разработанной модели.



а



б

Рис. 6. Распределения температур, °С, в поперечном сечении СШ при выполнении первого (а) и второго (б) проходов

Выводы

1. В результате математического моделирования тепловых процессов методом конечных элементов выполнена проверка справочных режимов сварки для рассматриваемых условий.

2. Моделирование проведено с учетом реальных геометрических параметров изготавливаемой ТСК, зависимости теплофизических

свойств материала от температуры и постепенного появления наплавленного металла СШ по мере перемещения сварочной дуги вдоль соединяемых кромок.

3. Полученные распределения температур в поперечном сечении СШ подтверждают прогрев свариваемых кромок до температуры ликвидуса вглубь основного металла, что исключает несплавление.

Литература

- [1] Чернышов Г.Г. *Технология сварки плавлением и термической резки*. Москва, Академия, 2011. 239 с.
- [2] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2008. 251 с.
- [3] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического ун-та, 2015. 571 с.
- [4] ГОСТ 4784–2019. *Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки*. Москва, Росстандарт, 2019.
- [5] Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А. *Справочник по конструкционным материалам*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.
- [6] Королев С.А. *Методика расчетной оценки стойкости сварных швов листовых конструкций из алюминиевых сплавов против образования продольных кристаллизационных горячих трещин*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007. 183 с.
- [7] ГОСТ 7871–75. *Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия*. Москва, Изд-во стандартов, 1994. 14 с.
- [8] ГОСТ 14806–80. *Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры*. Москва, Изд-во стандартов, 1991. 36 с.
- [9] Алешин Н.П., Чернышов Г.Г. *Сварка. Резка. Контроль: справочник*. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2004. 624 с.
- [10] Куркина С.А., Ховова В.М. *Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.
- [11] Куркин А.С., Макаров Э.Л. Программный комплекс «Сварка» — инструмент для решения практических задач сварочного производства. *Сварка и Диагностика*, 2010, № 1, с. 16–24.
- [12] ESI SYSWELD — *Моделирование и анализ сварки, сборки и термообработки*. URL: <https://www.esi-group.com/ru/programmnye-resheniya/virtualnoe-proizvodstvo/svarka-termoobrabotka/esi-sysweld> (дата обращения 31 января 2020).
- [13] *Simulating Welding with Simufact Welding*. URL: <https://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html> (дата обращения 31 января 2020).
- [14] *Thermal Model Simulation Analysis*. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/thermal-analysis> (дата обращения 31 января 2020).
- [15] *Система трехмерного моделирования КОМПАС-3D v19*. URL: <https://www.kompas.ru/kompas-3d/about/> (дата обращения 31 января 2020).
- [16] Кузнецов В.В., Водяков В.Н., Кузнецова О.М. *Технология «рождения» и «смерти» конечных элементов ANSYS Inc. (США). Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы*. Межвуз. сб. науч. тр., Саранск, Изд-во Мордов. ун-та, 2013, с. 392–401.

References

- [1] Chernyshov G.G. *Tekhnologiya svarki plavleniyem i termicheskoy rezki* [Fusion welding and thermal cutting technology]. Moscow, Akademiya publ., 2011. 239 p.

- [2] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksiy* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiya publ., 2008. 251 p.
- [3] Karkhin V.A. *Teplovyye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Politekhicheskiy un-t publ., 2015. 571 p.
- [4] GOST 4784—2019. *Alyuminiy i splavy alyuminiyevyye deformiruyemye. Marki.* [State Standard 4784—2019. Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades]. Moscow, Rosstandart publ., 2019.
- [5] Arzamasov B.N., Solov'yeva T.V., Gerasimov S.A. *Spravochnik po konstruksionnym materialam* [Construction Materials Reference]. Moscow, Bauman Press, 2005. 640 p.
- [6] Korolev S.A. *Metodika raschetnoy otsenki stoykosti svarnykh shvov listo-vykh konstruksiy iz alyuminiyevykh splavov protiv obrazovaniya prodol'nykh kristallizatsionnykh goryachikh treshchin.* Kand. Diss. [Method for calculating the resistance of welded joints of sheet structures made of aluminum alloys against the formation of longitudinal crystallization hot cracks. Cand. Diss.]. Moscow, 2007. 183 p.
- [7] GOST 7871–75. *Provoloka svarochnaya iz alyuminiya i alyuminiyevykh splavov. Tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 7871–75. Aluminium and aluminium alloys tiller wire. Specifications]. Moscow, Standartinform publ., 1994. 14 p.
- [8] GOST 14806–80. *Dugovaya svarka alyuminiya i alyuminiyevykh splavov v inertnykh gazakh. Soyedineniya svarnyye. Osnovnyye tipy, konstruktivnyye elementy i razmery* [State Standard 14806—80. Arc welding of aluminium alloys in inert gases. Welded joints. Main types, design elements and dimensions]. Moscow, Standartinform publ., 1991. 36 p.
- [9] Aleshin N.P., Chernyshov G.G. *Svarka. Reзка. Kontrol': spravochnik. V 2 t. T. 1.* [Welding. Cutting. Control: reference book. In 2 vol. Vol. 1.]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2004. 624 p.
- [10] Kurkina S.A., Khovova V.M. *Komp'yuternoye proyektirovaniye i podgotovka proizvodstva svarnykh konstruksiy* [Computer design and preparation for the production of welded structures]. Moscow, Bauman Press, 2002. 464 p.
- [11] Kurkin A.S., Makarov E.L. The program complex “Welding” is a tool for solving practical problems of welding production. *Welding and Diagnostics*, 2010, no. 1, pp. 16–24 (in Russ.).
- [12] ESI SYSWELD — *Modelirovaniye i analiz svarki, sborki i termoobrabotki* [ESI SYSWELD — Modeling and analysis of welding, assembly and heat treatment]. Available at: <https://www.esi-group.com/ru/programmnye-resheniya/virtualnoe-proizvodstvo/svarka-termoobrabotka/esi-sysweld> (accessed 31 January 2020).
- [13] *Simulating Welding with Simufact Welding*. Available at: <https://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html> (accessed 31 January 2020).
- [14] *Thermal Model Simulation Analysis*. Available at: <https://www.ansys.com/products/structures/thermal-analysis> (accessed 31 January 2020).
- [15] *Sistema trekhmernogo modelirovaniya KOMPAS-3D v19* [Three-dimensional modeling system KOMPAS-3D v19.]. Available at: <https://www.kompas.ru/kompas-3d/about/> (accessed 31 January 2020).
- [16] Kuznetsov V.V., Vodyakov V.N., Kuznetsova O.M. Technology of birth and death of finite elements of ANSYS Inc. (USA). *Energoeffektivnyye i resursosberegayushchiye tekhnologii i sistemy. Mezhevuz. sb. nauch. tr.* [Energy-efficient and resource-saving technologies and systems. Interuniversity collection of scientific papers]. Saransk, Ogarev Mordovia State University publ., 2013, pp. 92–401.

Статья поступила в редакцию 28.02.2020

Информация об авторах

КОРОЛЕВ Сергей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: korolevsa@bmstu.ru).

ЗИМАКОВ Артем Евгеньевич — техник-технолог. Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Мосэнерго» (ПАО «Мосэнерго») (119526, Москва, Российская Федерация, пр. Вернадского, д. 101, корп. 3, e-mail: artemezim@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Королев С.А., Зимаков А.Е. Компьютерное моделирование тепловых процессов при дуговой сварке толстостенных конструкций из алюминиевых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 8, с. 12–20, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-12-20

Please cite this article in English as:

Korolev S.A., Zimakov A.E. Computer Simulation of Thermal Processes in Arc Welding of Thick-Walled Aluminum Alloy Structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 12–20, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-12-20

Information about the authors

KOROLEV Sergei Anatolievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: korolevsa@bmstu.ru).

ZIMAKOV Artem Evgenievich — Process Technician. PAO Mosenergo (119526, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 3, e-mail: artemezim@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография А.А. Смердова «Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике. Краткий курс в тринадцати лекциях»

В курсе лекций приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Курс лекций предназначен для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru