



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКОПАЙКЕ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА ТИТАН–АЛЮМИНИЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **А. С. МИЛЕНИН**, **А. П. СЕМЕНОВ**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана математическая модель термодформационных процессов при сваркопайке стыковых соединений титана и алюминия, в рамках которой осуществлен анализ этих процессов и даны рекомендации по оптимизации производства направляющих кресел пассажирских авиалайнеров с разнородными соединениями.

*Ключевые слова: математическое моделирование, сваркопайка, титан, алюминий, термодформирование, остаточное напряженно-деформированное состояние*

В настоящее время применение сварки для получения неразъемных соединений металлических деталей находит все большее распространение, в частности в такой достаточно консервативной с точки зрения внедрения сварочных технологий отрасли, как авиастроение [1, 2].

Наиболее распространенными конструкционными материалами в авиастроении являются алюминий, титан и их сплавы [3]. С этой точки зрения определенный интерес представляют разнородные сварные соединения титана и алюминия.

Сварка разнородных соединений нередко представляет собой комплекс сложных взаимосвязанных физико-химических, термокинетических и металлургических процессов, которые в итоге определяют качество сварного соединения, что в свою очередь усложняет процесс оптимизации соответствующей технологии сварки [4, 5]. Экспериментальные исследования в этой области являются сложными и дорогостоящими, а полученные результаты не всегда однозначными, поэтому целесообразно использовать математическое моделирование кинетики процессов, имеющих место при получении разнородных сварных соединений, на базе соответствующих численных методов [6].

Качество и работоспособность разнородных сварных соединений определяются как процессами реакционной диффузии, которые могут привести к образованию хрупких интерметаллидных прослоек, так и кинетикой полей деформаций, что определяет конечную форму изделия, и напряжений, которые могут снизить работоспособность узла, стимулировать формирование горячих трещин, а также процессов стресс-коррозии.

При сварке изделий большой длины изменение их формы может иметь существенное значение. В частности, проблема предварительной оценки сварочных деформаций стала актуальной при оптимизации разработанного в Институте прикладных лучевых технологий (BIAS, Бремен, Германия) процесса производства титан-алюминиевых сварных направляющих кресел — элементов конструкции семейства пассажирских авиалайнеров A380 производства концерна «Airbus» [1].

Рассматриваемая конструкция — сварная направляющая кресел (рис. 1, а) — представляет собой двутавровую балку переменного профиля, сваренную продольным швом, одна половина которой изготовлена из титанового сплава Ti–6Al–4V (химический состав, мас. %: 5,3...6,8 Al; 3,5...5,3 V; 0,5 N; 0,1 C; 0,0125 H; 0,3 Fe), а вторая — из алюминиевого сплава AA6056 (химический состав, мас. %: 0,7...1,3 Si; 0,5 Fe; 0,5...1,1 Cu; 0,4...0,1 Mn; 0,6...1,2 Mg; 0,25 Cr; 0,1...0,7 Zn).

Экспериментальные исследования кинетики температурного поля и термодформационного состояния балки проводили в процессе ее сварки из тех же материалов сходной, но несколько упрощенной конструкции, элементы которой представлены на рис. 1, б. Во избежание формирования хрупких реактивных фаз в зоне разнородного контакта для получения неразъемного соединения титановой и алюминиевой части конструкции используется сваркопайка. Суть указанного сварочного процесса заключается в том, что технологические параметры подбираются таким образом, чтобы плавилась только алюминиевая часть изделия, а титановая оставалась твердой. При этом жидкий алюминий смачивает поверхность титана и образует с ним сварнопаяный контакт [1, 4–6].

Сварка титановой и алюминиевой частей изделия выполнена двумя лазерными лучами с обеих его сторон. При этом лучи одновременно пе-

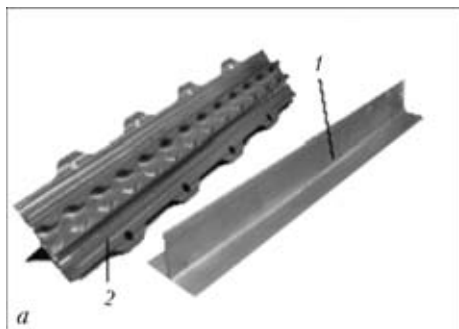


Рис. 1. Внешний вид свариваемых деталей — направляющей кресел (а) и балки упрощенной конструкции для экспериментальных исследований (б); 1, 2 — соответственно алюминиевая и титановая часть сварной балки

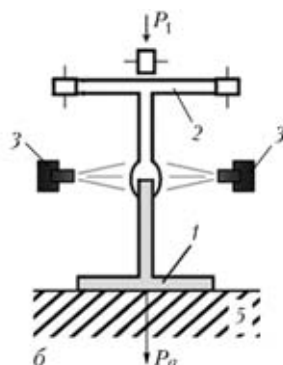
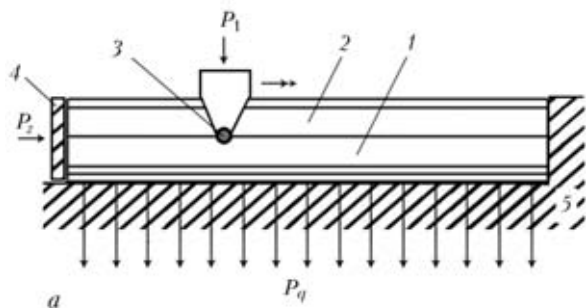


Рис. 2. Схема процесса получения лазерной сваркой соединения титан-алюминий: а — вид сбоку; б — торец; 1, 2 — соответственно титановая и алюминиевая часть изделия; 3 — лазерный источник сварочного нагрева; 4 — поршень, обеспечивающий осевое усилие; 5 — опорный стол

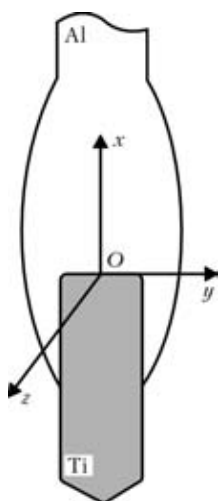


Рис. 3. Схема сварнопаяного соединения

ремещаются вдоль сварного шва, как показано на рис. 2 (двойной стрелкой обозначено направление движения лазерного источника нагрева вдоль свариваемого образца). Изделие находится в оснастке, обеспечивающей равномерное прижатие к опорному столу (прижимающее распределенное усилие  $P_q$ ), осевое усилие  $P_z$  воздействует равномерно на плоскость торца свариваемого изде-

лия посредством поршня, форма которого повторяет геометрию поперечного сечения балки, а перемещающаяся «каретка» с лазером, прижимающей силой  $P_1$  воздействует на верхнюю плоскость — алюминиевую полку.

Схема сварнопаяного соединения, представлена на рис. 3, а геометрические параметры разнородной направляющей кресел, а также сварной балки упрощенной конструкции — в табл. 1.

Технологические параметры процесса сварки стыкового соединения следующие:

Скорость перемещения источника вдоль соединения направляющей кресел (балки упрощенной конструкции), мм/с	4,33 (3,67)
Мощность каждого из источников, кВт	1,75
Диаметр сварочного пятна, мм	5
Прижимающая сила на «каретке» $P_1$ , Н	754
Прижимающее распределенное усилие $P_q$ , Н/мм	4,41
Осевое усилие $P_z$ , Н	376

Для описания термодформационных процессов сваркопайки разнородной титан-алюминиевой балки типа направляющей кресел разработана и реализована математическая модель.

Коэффициент полезного действия (КПД) лазерного источника нагрева зависит от таких па-

Таблица 1. Геометрические параметры разнородной направляющей кресел и сварной балки упрощенной конструкции

Конструкция	Длина балки, мм	Толщина части стенки балки, мм		Толщина алюминиевой полки балки, мм	Высота части стенки балки, мм	
		Al	Ti		Al	Ti
Направляющая кресел	1000	2,0	1,8	3,2	38,4	42,6
Балка упрощенной конструкции	1000	2,0	1,9	5,0	42,0	48,0



раметров, как распределение энергии в сварочном пятне, угол падения светового пучка на поверхность, состояние поверхности и др. В связи с этим целесообразно экспериментальным путем определить значения этого коэффициента отдельно для каждого конкретного случая сварки.

В рассматриваемом случае КПД лазера при воздействии на каждую из частей разнородной поверхности находили путем сравнения температурных циклов в различных точках изделия, экспериментально измеренных в процессе сварки с помощью набора термпар, с кинетикой температурного поля, полученной численным решением уравнения теплопроводности [7].

Используемые для расчета свойства титанового и алюминиевого сплавов приведены в табл. 2.

Наилучшее соответствие численных и экспериментальных данных по температурным циклам, а также по форме проплавления наблюдается со значением коэффициента эффективности источника сварочного нагрева 0,17 и 0,35 (соответственно при воздействии на поверхность алюминия и титана). Разница в значениях эффективности теплового воздействия лазера на эти металлы вызвана в первую очередь большей по сравнению с титаном отражающей способностью поверхности алюминия.

Полученные значения коэффициента эффективности позволяют с достаточно высокой точностью рассчитать кинетику температурного поля в изделии при сварочном процессе. Результаты этого расчета и их экспериментальные данные приведены на рис. 4.

Методика численного определения полей напряжений и деформаций, формирующихся в процессе сварки, основана на решении соответствующих задач нестационарной термопластичности путем последовательного прослеживания развития упру-

гопластических деформаций с исходного состояния (перед началом сварки) и вплоть до конечного состояния (после полного охлаждения и снятия технологической оснастки [8]). Поскольку длина свариваемой разнородной балки значительно превосходит характерные размеры поперечного сечения, то для описания деформирования ее оси вследствие неравномерного нагрева может быть использована двумерная модель кинетики напряженно-деформированного состояния. При этом учитывался тот факт, что изделие является симметричным относительно плоскости  $xOz$  (см. рис. 3).

Как показано на рис. 5, а, экспериментальное значение максимального остаточного прогиба алюминиевой полки балки упрощенной конструкции при рассматриваемых технологических параметрах составляет 8 мм, что с хорошей степенью точности соотносится с расчетными данными, представленными на рис. 5, б.

При сварке направляющей кресел численный анализ в рамках модели показал, что максимальное остаточное изгибное перемещение  $U_x$  алюминиевой полки составляет менее 10,5 мм (рис. 6, а).

Для того чтобы исключить из технологического цикла последующую обработку изделия с целью уменьшения кривизны оси сварной балки, степень остаточного деформирования может быть снижена путем оптимизации сварочного процесса. Это может быть сделано посредством изменения силового воздействия на изделие в оснастке при сварке или смещения положения линии сварного шва (т. е. изменением соотношения длины алюминиевой и титановой частей стенки сварной балки).

Как показал численный расчет, изменение усилий в оснастке малоэффективно, поскольку даже жесткое закрепление (что означает равенство нулю текущих изгибных перемещений оси) умень-

**Таблица 2. Физические свойства титанового и алюминиевого сплавов, используемые в математической модели [8–10]**

Физический параметр	Температура, °С							
	20	100	200	300	400	500	600	700
Ti-6Al-4V								
Теплопроводность, Дж/(°С·см·с)	0,059	0,072	0,086	0,100	0,114	0,128	0,142	0,156
Теплоемкость, Дж/(см <sup>3</sup> ·°С)	2,48	2,50	2,57	2,70	2,83	3,01	3,23	3,54
Предел текучести, МПа	1060	870	720	630	570	460	350	230
Модуль Юнга, ГПа	119	115	110	104	97	91	85	80
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>5</sup> ·°С <sup>-1</sup>	0,71	0,80	0,89	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98
AA6056								
Теплопроводность, Дж/(°С·см·с)	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	5,0
Теплоемкость, Дж/(см <sup>3</sup> ·°С)	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	2,95	3,00	3,00
Предел текучести, МПа	220	213	200	188	140	100	20	20
Модуль Юнга, ГПа	98	95	90	80	70	60	50	40
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>4</sup> ·°С <sup>-1</sup>	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28

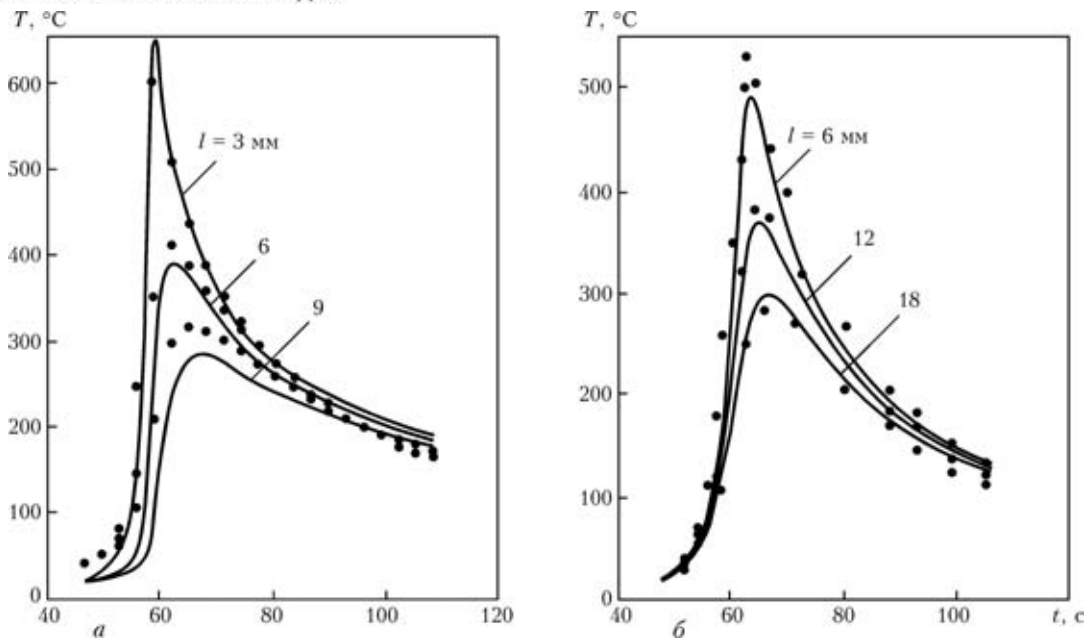


Рис. 4. Расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) значения температурных циклов, полученные на различном расстоянии  $l$  от края титановой кромки в сторону титановой (а) и алюминиевой (б) частей изделия

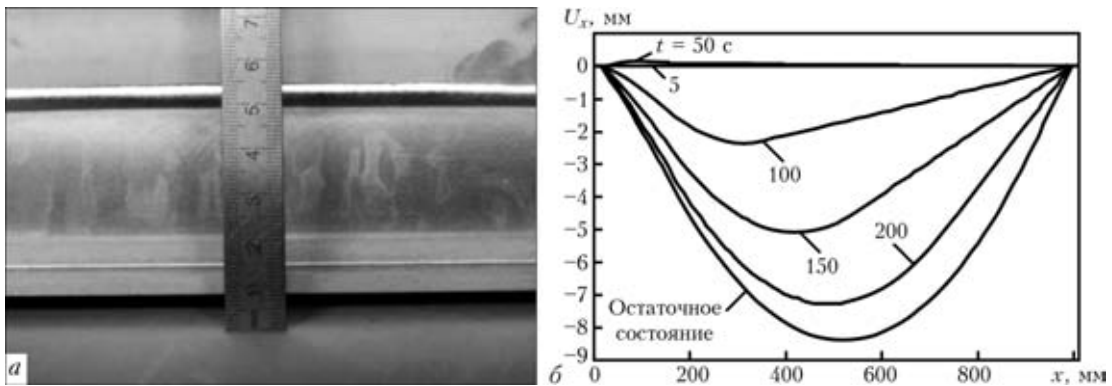


Рис. 5. Остаточный изгиб сварной балки упрощенной конструкции, измеренной экспериментально, (а) и перемещения  $U_x$  ее оси по линии шва в различные моменты времени  $t$  согласно расчету (б)

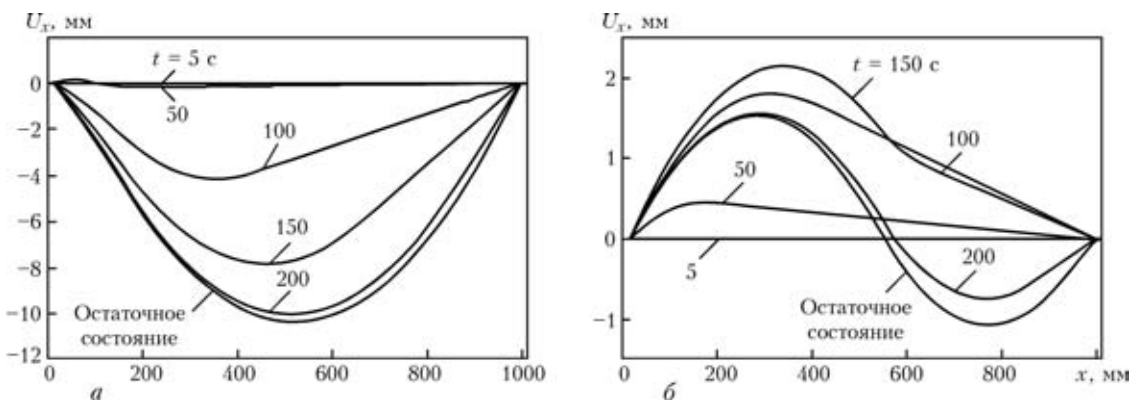


Рис. 6. Перемещения  $U_x$  оси сварнопаяющей направляющей кресел в различные моменты времени  $t$  согласно численному расчету: а — исходная конфигурация; б — оптимизированное положение сварного шва (смещение на 26 мм в сторону титановой части)

шает остаточные максимальные перемещения на 2...3 мм.

Наилучший эффект в данном случае дает смещение положения линии сварного шва в сторону титановой части изделия (что желательно с точки

зрения снижения массы конструкции). Так, смещение линии шва на 26 мм в этом направлении влечет уменьшение остаточного изгиба направляющей кресел более чем в 3 раза (рис. 6, б).



**Выводы**

1. На основе математического моделирования кинетики температурного поля при лазерной сваркопайке титан-алюминиевой конструкции (направляющей кресел пассажирских авиалайнеров) путем сравнения экспериментальных и численных результатов получены значения коэффициента эффективности теплового воздействия лазера на поверхность алюминия и титана, составляющие соответственно 0,17 и 0,35.

2. Исследования термодформационных процессов при сваркопайке встык титан-алюминиевой направляющей кресел и модельной упрощенной конструкции показали, что остаточные изгибные перемещения достигают соответственно 10,5 и 8,5 мм, что хорошо соотносится с экспериментальными данными.

3. Обнаружено, что уменьшение остаточных изгибов путем варьирования усилий, прикладываемых к свариваемому изделию в оснастке, вплоть до жесткого закрепления малоэффективно.

4. Снижение степени остаточного деформирования может быть достигнуто смещением положения сварного шва в сторону титановой части балки: при изменении положения линии шва на 26 мм максимальный остаточный прогиб уменьшится в 3 раза по сравнению с первоначальной геометрией сварного соединения.

*Авторы исследования признательны доктору Томасу Преториусу и его коллегам из BIAS (Германия) за плодотворное сотрудничество, благодаря которому проведена корректная валидация полученных результатов.*

1. Kreimer M., Vollertsen F. Processing titanium-aluminum hybrid joints for aircraft applications // Proc. of the Third intern. WLT-conf. on lasers in manufacturing, Munich, June, 2005. — Munich, 2005. — P. 238–243.
2. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry / E. Schubert, M. Klassen, Y. Zerne et al. // J. of Materials Proc. Technology. — 2001. — **115**, № 1. — P. 2–8.
3. Williams J. C., Starke Jr. E. A. Progress in structural materials for aerospace systems // Acta Materialia. — 2003. — № 51. — P. 5775–5799.
4. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
5. *Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М.* Сварка разнородных материалов. — Киев: Техніка, 1975. — 206 с.
6. *Рябов В. Р.* Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
7. Numerical methods of the predictions of welding stresses and distortions / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. — Amsterdam: Harwood Acad. publ., 1999. — Vol. 13, pt. 1. — 146 p. — (Welding and Surfacing Rev.).
8. Jordan A. Input data for Abaqus simulation LABRA: Theory manual. — Rhode Island: Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 2006. — 68 p.
9. *Wischhusen B.-M., Kreimeyer M.* Second progress report of laser joining development for aluminum-titanium seat tracks at BIAS. — Bremen: BIAS-Verlag, 2006. — 44 p.
10. *Boyer R., Welsch G., Collings E. W.* Materials properties Handbook. Titanium alloys. — Miami: ASM International, 1994. — 1169 p.

Mathematical model of thermal-deformation processes occurring in braze-welding of butt joints between titanium and aluminium was developed. Analysis of these processes was conducted within the frames of this model, and recommendations were worked out for optimisation of production of passenger aircraft seat guides comprising dissimilar welded joints.

Поступила в редакцию 26.02.2007

**Вышел в свет очередной (№ 18) выпуск журнала фирмы «Fronius» Weld+Vision на русском языке**

**От редактора 3-6**

Определенное звучание каждого покупаемого предмета

**Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы 7-11**

Процесс дизайна на примере свободной формы представления текста

Плазменная сварка в эру цифровых технологий

**Компания 12-13**

Открытие нового центра материально-технического обеспечения

**Кратко и по существу 14-15**

Новости от «Fronius»

**Практические примеры 16-19**

VarioSynergic соединяет границы

**Компания 20-21**

Путь к совершенному дизайну

**Информация для путешественников 22-23**

Мексика приглашает на крупное культурное событие



**По вопросам заказа просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка»**

**Тел./факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23, 528-04-86; E-mail: journal@paton.kiev.ua**