

УДК 621.791.14

## **Определение тепловых напряжений и деформаций при фрикционной сварке трехслойных панелей из алюминиевых сплавов**

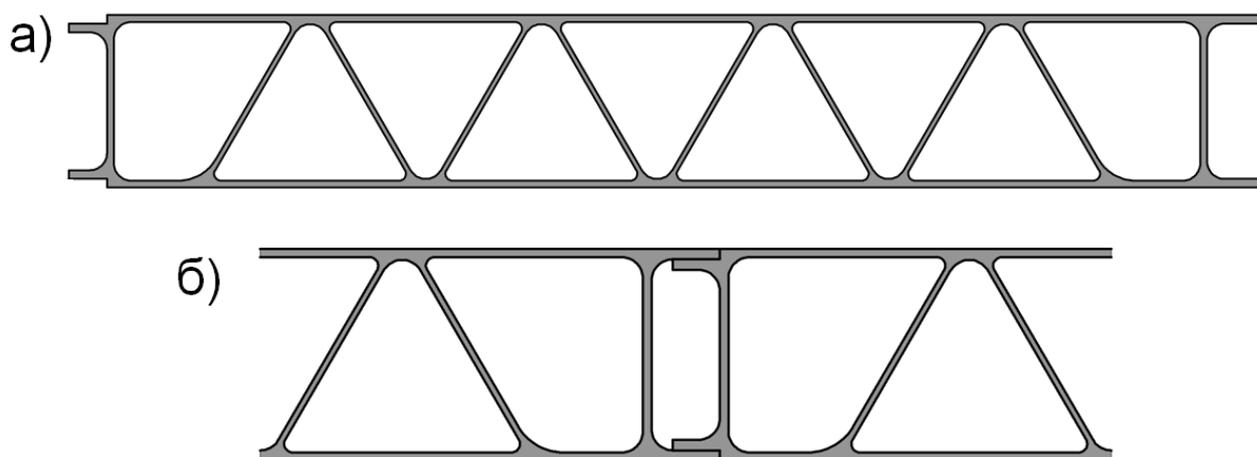
Штрикман М.М., Кащук Н.М.

### **Аннотация**

В работе описана конечно-элементная модель, позволяющая рассчитывать напряжения и деформации при фрикционной сварке. Приведен пример практического применения модели для определения оптимальных параметров режима сварки.

**Ключевые слова:** фрикционная сварка; сварка трением с перемешиванием; трехслойные панели; тепловые процессы; остаточные деформации; компьютерное моделирование.

В последнее время трехслойные панели из алюминиевых сплавов (рис. 1) находят все большее применение в различных отраслях промышленности: панели пола грузовых самолетов, настилы взлетно-посадочных полос на пересеченной местности, корпуса вагонов, палубы судов и т.д. Высокая жесткость в сочетании с малой массой делает такие панели перспективной заменой традиционным балочным конструкциям.

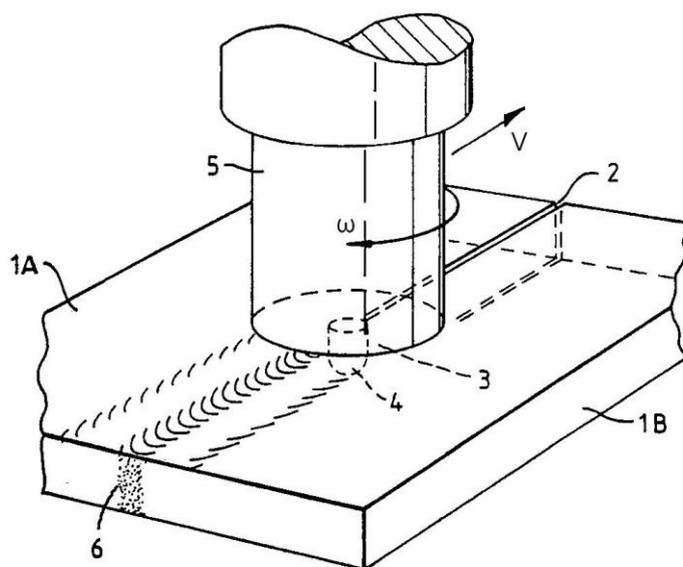


**Рис. 1.** а) Поперечное сечение трехслойной панели; б) Схема сборки трехслойных панелей под сварку.

Дуговая сварка алюминиевых сплавов, помимо традиционных проблем, таких как пористость и трещинообразование, приводит к возникновению в конструкции значительных остаточных напряжений и деформаций. Для их снижения целесообразно применять способы сварки, обеспечивающие малое тепловложение, например фрикционную сварку (ФС).

Процесс сварки трением листовых деталей «в стык» линейным швом (фрикционная сварка) был изобретен лишь в середине 20ого века [1] и запатентован в 1993 году [2], после чего началось его интенсивное развитие и промышленное применение.

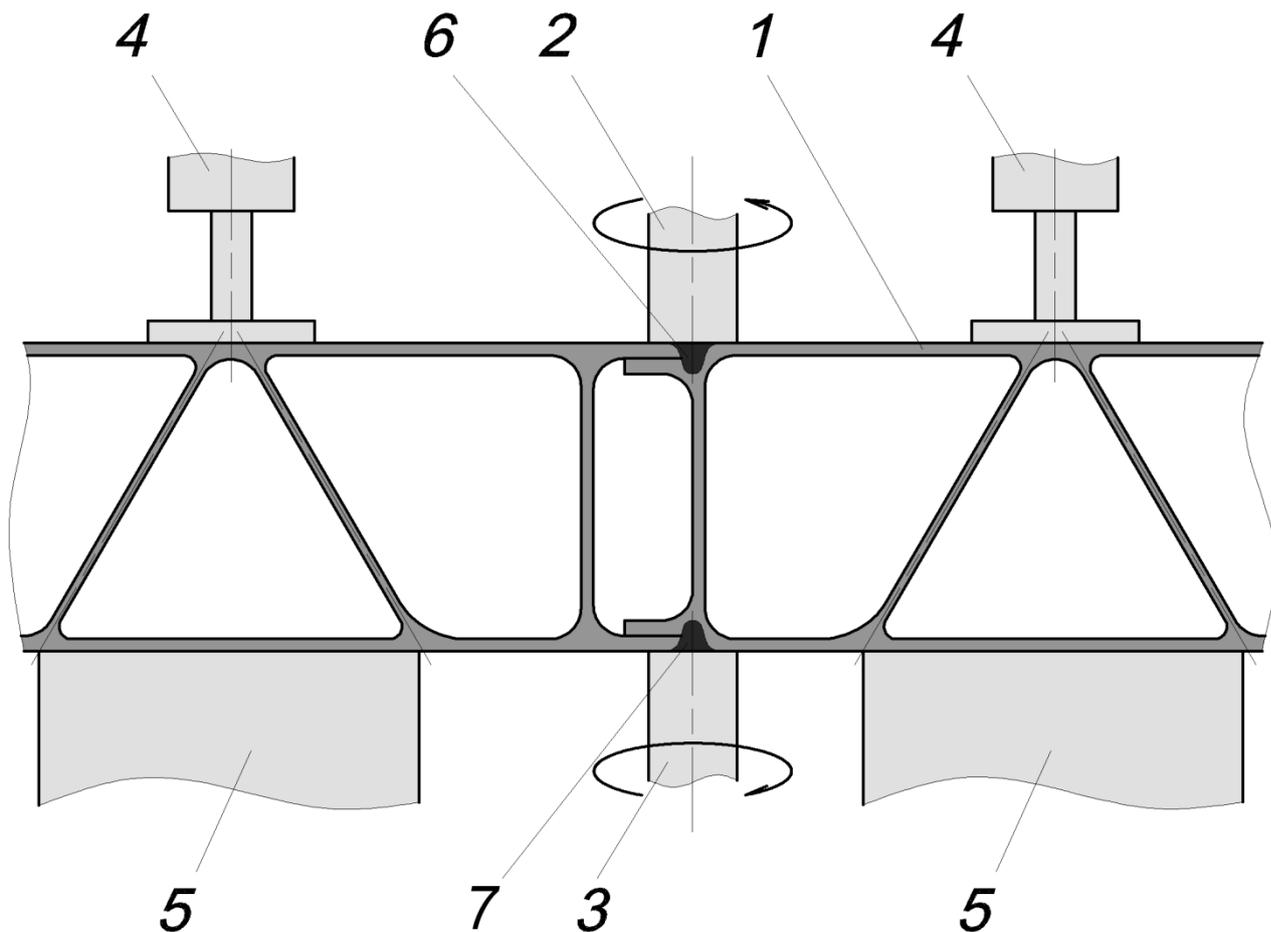
При ФС (рис. 2) вращающийся инструмент 5, состоящий из корпуса с опорным буртом 3 и рабочим стержнем 4, погружается в зазор 2 между соединяемыми деталями 1А и 1В. После погружения инструмент, продолжая вращаться, перемещается вдоль стыка. Тепла, выделяющегося при трении, достаточно для пластификации металла заготовок в зоне стыка и вращающийся инструмент «перемешивает» его, соединяя заготовки между собой с образованием сварного шва 6. В результате получается сплошной шов со свойствами во многом превосходящими свойства шва, полученного дуговыми методами сварки [3].



**Рис. 2.** Схема процесса ФС

Основной особенностью ФС является то, что процесс сварки проходит в твердой фазе (материал заготовок не плавится). Это позволяет устранить причины образования горячих трещин и пор, что обеспечивает возможность соединения ограниченно свариваемых плавлением алюминиевых, магниевых и медных сплавов. Также для ФС характерны малые остаточные напряжения и деформации, поскольку материал свариваемых заготовок нагревается до температур ниже температуры плавления, что приводит к меньшему, чем при сварке плавлением, градиенту температур в области сварного шва. Кроме того, процесс легко поддается автоматизации и обладает высокой экологичностью.

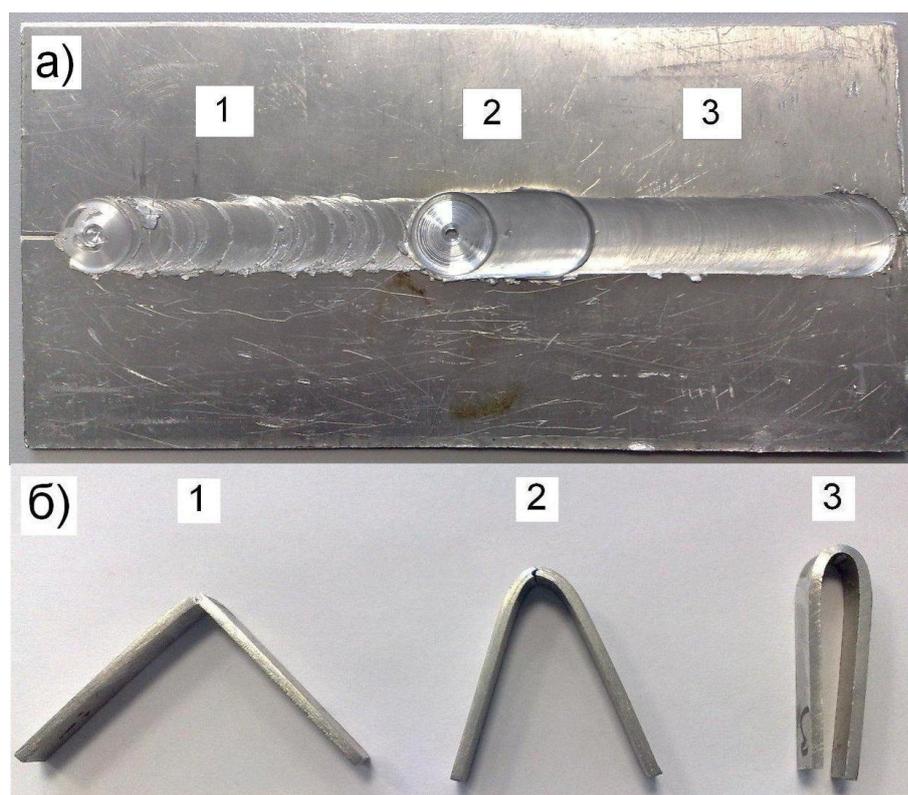
Поскольку процесс ФС нечувствителен к пространственному положению, то сварку панелей можно производить одновременно двумя инструментами в нижнем и потолочном положении [4]. Такой процесс более производительен, и кроме того, при односторонней сварке после выполнения первого прохода панель деформируется, что может нарушить точность сборки под сварку второго стыка. Схема процесса показана на рис. 3: свариваемые панели 1 собираются на опорах 5 и фиксируются прижимами 4, после чего инструментами 2 и 3 производят сварку панелей, образуя швы 6 и 7.



**Рис. 3.** Схема двусторонней ФС панелей. 1 – свариваемые панели; 2, 3 – сварочные инструменты; 4 – прижимы; 5 – опоры; 6, 7 – сварные швы.

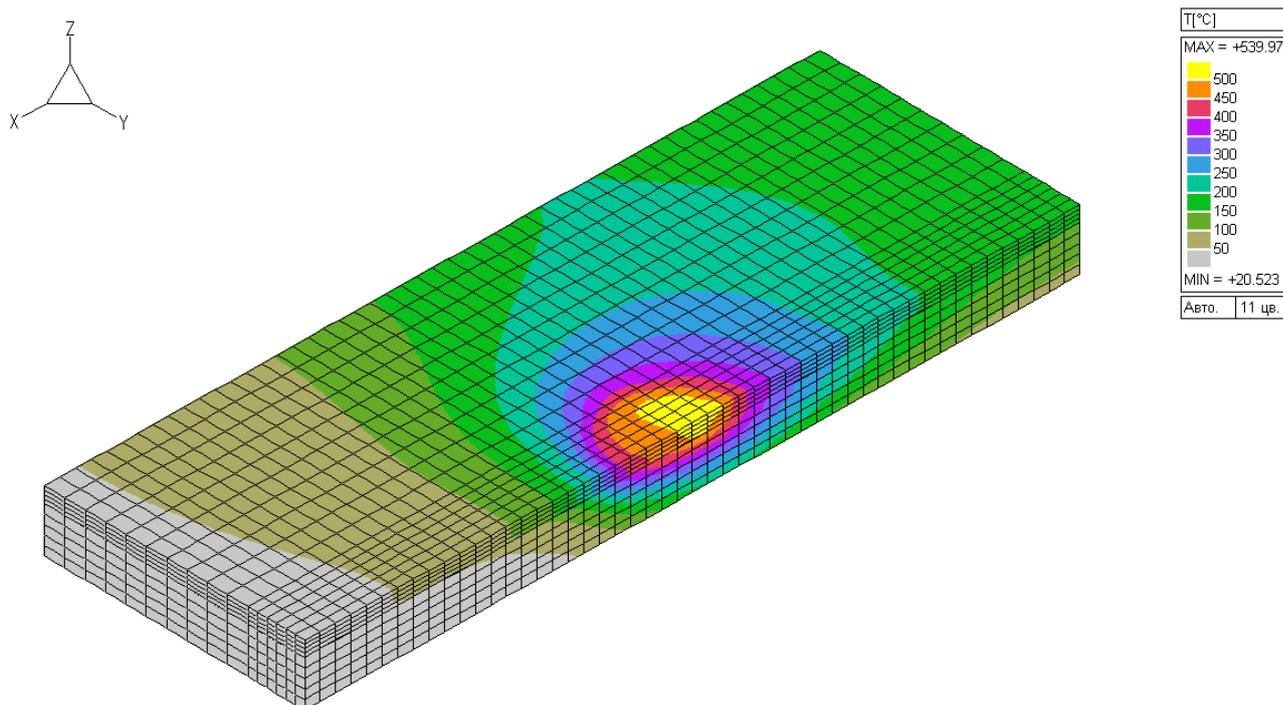
Основными параметрам процесса ФС являются скорость сварки, скорость вращения инструмента, глубина погружения и угол наклона инструмента. Материал и конструктивные параметры инструмента (размеры опорного бурта и рабочего стержня, наличие и параметры нарезки на рабочем стержне и опорном бурте, форма рабочего стержня и т.д.) также оказывают значительное влияние на процесс сварки. В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по подбору режима ФС, поэтому параметры сварки подбирают экспериментальным путем: пластины свариваются на различных режимах, после чего из них вырезаются сварные образцы и проводятся их испытания по результатам которых определяют наиболее правильные параметры режима сварки.

Для подбора глубины погружения инструмента при сварке пластин сплава АД-31 толщиной 2 мм, сваривались пластины со скоростью вращения инструмента 1000 об/мин и скоростью сварки 160 мм/мин на трех режимах (рис. 4), которые отличались глубиной погружения инструмента: режим 1 – при глубине погружения 1.8 мм, режим 2 – 2.0 мм, режим 3 – 1.9 мм. Как видно из результатов испытания на статический загиб (см. рис. 4б), наиболее подходящим оказался режим 3. Нужно отметить, что глубина погружения является одним из параметров режима сварки и ее оптимальное значение может меняться при изменении остальных параметров режима сварки, толщины и марки свариваемого материала и конструкции инструмента. Таким образом, экспериментальный способ подбора параметров режимов сварки, требующий значительных временных и материальных затрат, носит эвристический характер и не позволяет определять действительно оптимальные значения параметров режима сварки.



**Рис. 4.** Экспериментальный подбор режимов ФС: а) Пластина, сваренная на различных режимах: 1, 2 и 3; б) Образцы, сваренные на режимах 1, 2 и 3 после испытания на статический изгиб.

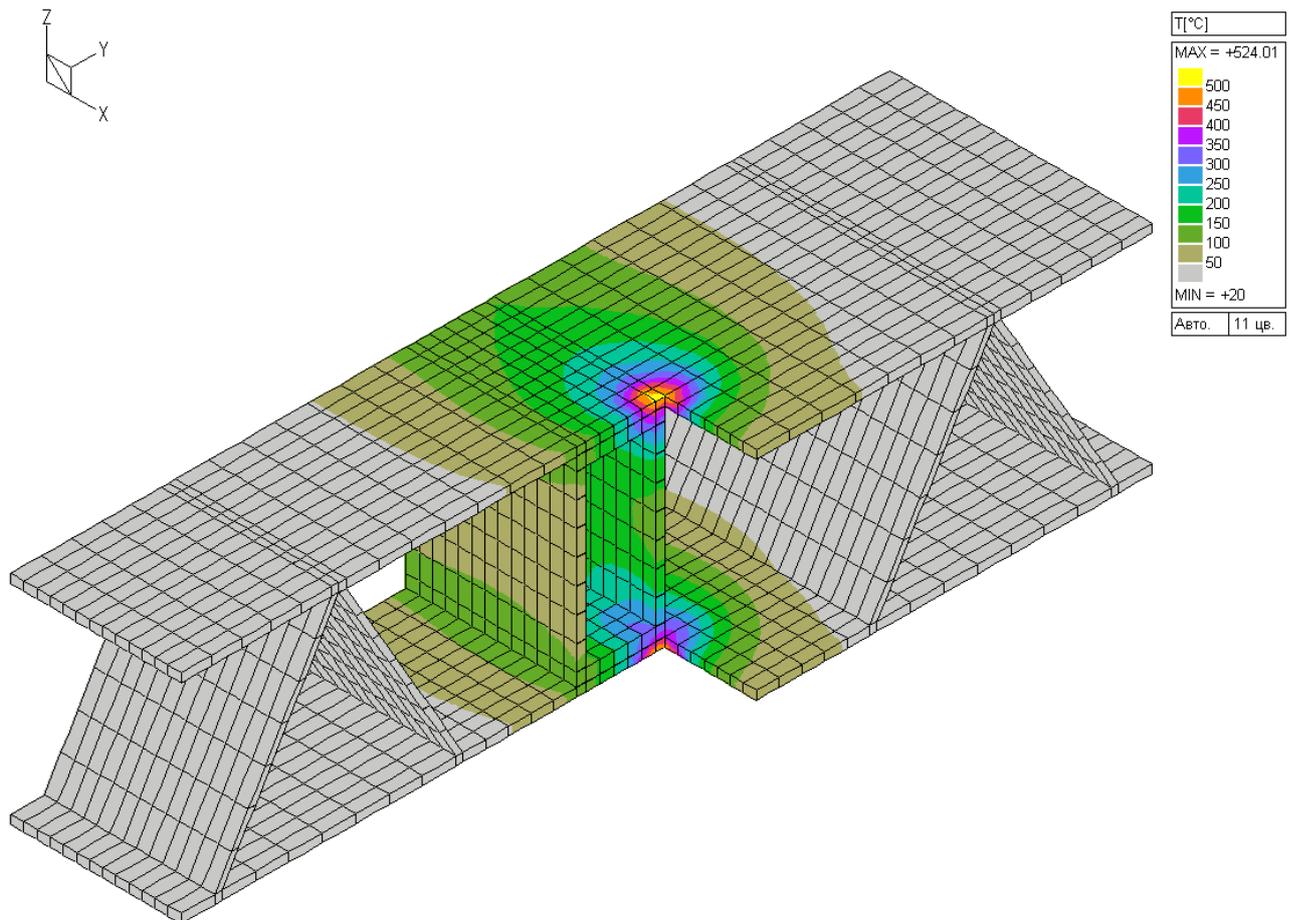
Предлагается определять оптимальные параметры режима сварки более экономичным и оперативным методом - численным моделированием. В работе определяются параметры режима сварки, обеспечивающие минимальные остаточные напряжения и деформации при сварке трехслойных панелей из алюминиевых сплавов. Поскольку причиной образования сварочных напряжений и деформаций является неравномерный нагрев, то для достижения поставленной цели была построена конечно-элементная тепловая модель процесса ФС и проверена ее адекватность. Такая модель, учитывающая распределенный характер источника теплоты, зависимость физических свойств материала от температуры, а также теплоотвод в воздух и технологическую оснастку, была построена в программном комплексе «СВАРКА» [5] и описана в работе [6]. Построенная модель позволяет рассчитывать температуры нагрева в каждой точке свариваемых заготовок. На рис. 5 показаны расчетные тепловые поля при ФС пластин из сплава АД-31 толщиной 2 мм при параметрах сварки, соответствующих режиму «З» на рис. 4.



**Рис. 5.** Конечно-элементная тепловая модель процесса ФС плоских образцов из сплава АД-31 толщиной 2 мм (показана половина модели).

Тепловая модель, построенная для пластины, была перенесена на геометрию трехслойной панели и был проведен расчет тепловых полей при двухсторонней ФС панелей. В данном случае тепловое поле не является симметричным относительно оси шва. Поэтому

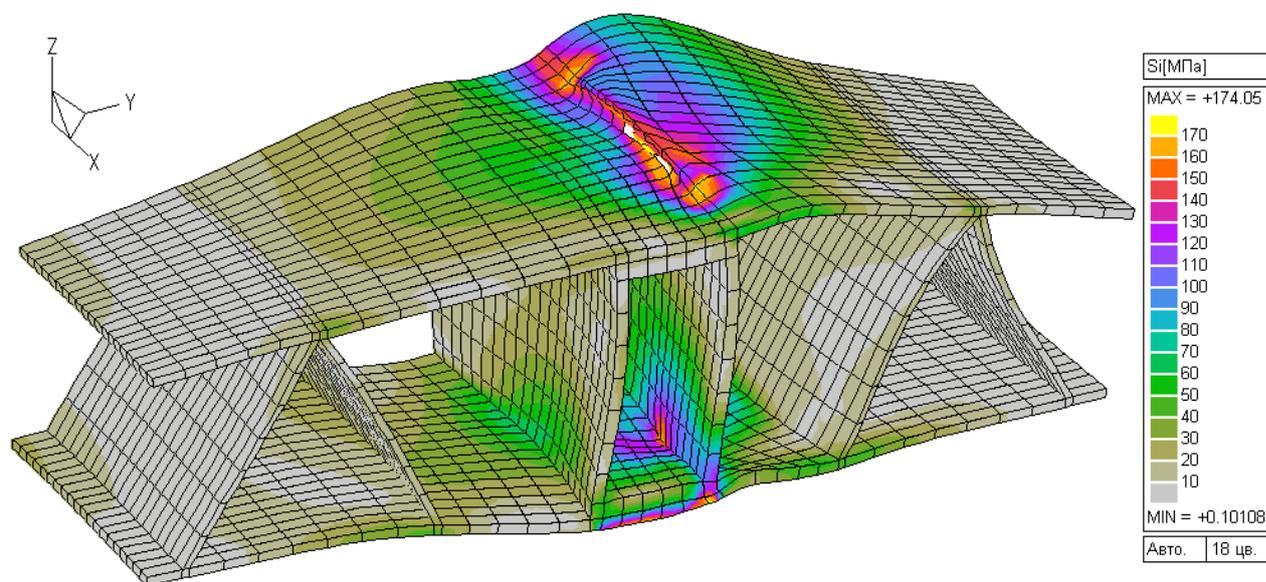
нет возможности рассмотреть половину модели, как это было сделано с тепловым полем пластин. Для уменьшения времени расчетов рассматривали фрагмент панели размером 120x400x100 мм. На рис. 6 показаны расчетные тепловые поля при двусторонней сварке трехслойной алюминиевой панели из сплава АД-31, при этом в модель введены два одновременно действующих источника теплоты. На рисунке видно распределение теплоты в зонах ребра и на поверхности (внешней и внутренней) верхнего и нижнего полотна панели.



**Рис. 6.** Расчетные тепловые поля при двусторонней ФС трехслойной панели из сплава АД-31 (панель показана в разрезе: вырезана четверть).

На основании расчета тепловых полей в панели можно, задав параметры ее закрепления в оснастке (см. рис. 3), провести расчет сварочных временных и остаточных напряжений и деформаций (рис. 7). Основой такой модели является количество вводимой теплоты, которое относится к входным параметрам модели. Также входными параметрами являются время выдержки перед сваркой, скорость перемещения источника теплоты, размер источника теплоты и распределение мощности в нем, теплофизические свойства свариваемого материала и оснастки, размеры и форма свариваемых заготовок и параметры закрепления заготовок в оснастке. Построенная модель показывает результаты, совпадающие

с общими представлениями о физике процесса деформирования заготовок при сварке, но для окончательной проверки ее точности в последующих работах будут проведены эксперименты по ФС панелей с замером сварочных тепловых деформаций.



**Рис. 7.** Поля интенсивности остаточных напряжений при ФС панелей (деформации увеличены в 1000 раз).

Таким образом, путем проведения серии расчетов для различных параметров режима сварки методом конечных элементов с помощью построенной модели были определены для нашего случая следующие параметры процесса, обеспечивающие получение минимальных остаточных напряжений и деформаций при качественном формировании шва: скорость сварки: 100 мм/мин, скорость вращения инструмента: 1200 об/мин, угол наклона инструмента: 2,5°.

### **Вывод:**

Построенная конечно-элементная модель позволяет, исходя из мощности источника теплоты, теплофизических свойств свариваемого материала, геометрии заготовок, конструктивных параметров оснастки и инструмента, определять параметры режима сварки, обеспечивающие минимальные остаточные напряжения и деформации при фрикционной сварке трехслойных алюминиевых панелей.

## **Список литературы**

1. Авторское свидетельство 195846 (СССР), 1967 г.
2. International Patent WO 93/10935 (TWI, Great Britain), 1993 г.
3. Perinet R., Goussain J.C., Costa B.D. Comparison of the mechanical and corrosion behavior between friction stir welded joints and MIG welded joints in 7020 aluminium alloy // 5<sup>th</sup> International Symposium of friction stir welding. Metz (France), 2004.
4. Wood M., Larsson S., Dahlstrom H. Environmental comparison of FSW against MIG in aluminum Railway Rolling Stock // 3<sup>rd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan), 2001.
5. Программный комплекс «Сварка» - инструмент для решения практических задач сварочного производства / Куркин А.С., Макаров Э.Л. // Сварка и диагностика. 2010. №1. С. 16 – 24.
6. Моделирование тепловых процессов при фрикционной сварке / Макаров. Э.Л., Королев С.А., Штрикман М.М., Кащук Н.М. // Сварка и диагностика. 2010. №3. С. 21 – 25.

## **Сведения об авторах:**

Штрикман Михаил Михайлович, профессор Национального института авиационных технологий (ОАО НИАТ), д.т.н. Москва. E-mail: shtrikman@gmail.com.  
Кащук Николай Михайлович – аспирант Национального института авиационных технологий (ОАО «НИАТ»). Москва. E-mail: nkashchuk@gmail.com. Тел.: +7 (495) 311-01-66