

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.791.01

Б.П. Конищев<sup>1</sup>, Е.А. Пигалова<sup>2</sup>, Н.А. Курников<sup>2</sup>

### ДИНАМИКА СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПРИМЕНЕНИЕ РЯДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПО СНИЖЕНИЮ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ОТКЛОНЕНИЙ КОНТУРА СВАРНОЙ АВИАЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО НАЗ «Сокол»<sup>2</sup>

Рассмотрены вопросы возникновения остаточных деформаций и напряжений. Приведена методика замеров деформаций контура сварной авиационной конструкции. Исследовано влияние ряда технологических приемов на изменение величины деформационных отклонений контура сварной авиационной конструкции.

*Ключевые слова:* остаточные деформации и напряжения, сварная авиационная конструкция, методы предупреждения сварочных деформаций.

Сварка как способ соединения материалов получила широкое развитие. Преимущества сварных соединений по сравнению с другими типами неразъемных соединений весьма значительны. Однако в сварочном процессе имеются свои недостатки. В процессе сварки возникают напряжения и деформации, которые в ряде случаев могут оказать отрицательное влияние на качество сварной конструкции. Во время изготовления сварных конструкций искажаются проектные формы и размеры изделий, на восстановление которых затрачивается много трудовых и временных ресурсов. Между тем, правильное построение технологического процесса сборки и сварки, а также выбор рациональных режимов сварки, как правило, позволяют избежать чрезмерных деформаций [1].

Одной из важных задач в совершенствовании изготовления сварных конструкций является улучшение их технологичности, повышение надежности и долговечности. Решение этих вопросов связано с совершенствованием методов расчета и проектирования конструкций, улучшением технологии их изготовления.

Поскольку речь идет об авиационной технике, следовательно, о конструкции, разрушение которой влечет за собой человеческие жертвы, задачи повышения качества, надежности, работоспособности и долговечности приобретают особо важное значение для предприятия-изготовителя.

При проектировании сварных конструкций необходимо считаться с возможностью появления в них значительных остаточных деформаций и напряжений и принимать меры для их предотвращения или ограничения в таких пределах, при которых влияние их не будет опасным.

Впервые на возникающие при сварке деформации и напряжения и на необходимость их учета указал изобретатель электрической дуговой сварки металлическим электродом Н.Г. Славянов. Он отметил, что причиной появления сварочных напряжений является неравномерный нагрев изделия при сварке, вызывающий местные пластические деформации. При

этом он еще тогда указывал на разницу проявления сварочных напряжений в хрупких и пластичных металлах, а также на особую опасность напряжений, появляющихся при сварке жестко закрепленных деталей. Н.Г. Славянов разработал и некоторые меры борьбы с вредным влиянием напряжений (предварительный подогрев изделия, проковка сварных швов и др.), которые применяются и в настоящее время.

Необходимо отметить, что появление деформаций и напряжений в результате воздействий, оказываемых при обработке, не является исключительно особенностью сварных конструкций. Общеизвестно, что деформации и напряжения появляются при применении всех методов обработки металла. Это относится к литью, прокатке, штамповке, клепке, вальцовке, обработке резанием, термической обработке и другим методам. Изготовление сложнейших сварных конструкций стало возможным благодаря решению учеными ряда научных проблем, в том числе и проблемы управления сварочными деформациями и напряжениями.

По эксплуатационным условиям и по условиям прочности необходимо обеспечивать определенную точность изготовления конструкций, поэтому появление в них сварочных деформаций является нежелательным. В связи с этим разработка мер для предупреждения сварочных деформаций является одной из основных задач технологического процесса изготовления сварных конструкций.

Основным источником образования собственных напряжений при сварке является неравномерный разогрев свариваемых деталей. При рассмотрении процесса образования собственных сварочных напряжений следует учитывать следующие обстоятельства. Термический цикл при сварке, то есть период нагрева и охлаждения свариваемых элементов, представляет собой нестационарный тепловой процесс, интенсивно меняющийся в функции времени; температура каждой точки изделия зависит от двух параметров – ее координат и рассматриваемого момента времени.

Физико-механические свойства металла в течение термического цикла непрерывно меняются параллельно изменениям температуры. В некоторой степени изменяются в зависимости от температуры физические характеристики металла: коэффициент температурного расширения, коэффициент теплопроводности и т.д. В значительно большей мере зависят от температуры механические свойства металлов: пределы прочности и текучести, модуль упругости и т.д. Законы изменения механических свойств металлов в зависимости от температуры изучены лишь частично.

Значительное влияние на развитие деформаций оказывают геометрические параметры свариваемых элементов. Учет этих параметров затруднителен, так как металл при сварке находится в различных фракционных состояниях. В сварочной ванне металл находится в жидком состоянии, в прилегающей к ванне зоне – в пластическом, в более удаленной – упруго-пластическом и упругом. Указанные обстоятельства затрудняют определение напряжений, образуемых в процессе сварки, расчетным путем. При сварочном процессе образуются напряжения всех трех родов: первого рода – макроскопические, второго рода – уравнивающиеся в микроскопических объемах, третьего рода – уравнивающиеся в ультрамикроскопических объемах.

В результате неравномерного нагрева элемента при сварке в нем возникают объемные напряжения по различным направлениям в пространстве. В элементах относительно небольшой толщины, например, меньше 30 мм, компонент собственных напряжений, направленный по толщине, весьма мал. Поле собственных напряжений при сварке рассматривается весьма часто как плоскостное. Во многих типах соединений, например, в продольных швах, в элементах больших толщин поля собственных напряжений условно принимаются как одноосные.

Существуют следующие факторы, вызывающие напряженно-деформационное состояние сварной конструкции:

- а) остаточные продольные пластические деформации укорочения в пластической зоне;
- б) равномерная или неравномерная по толщине пластическая деформация укорочения в поперечном направлении;

в) несовпадение центра тяжести поперечного сечения зоны пластических деформаций укорочения с центром тяжести поперечного сечения свариваемых элементов;

г) структурные изменения, вызванные сварочным нагревом.

Сварочные остаточные деформации и напряжения в конструкциях в большинстве случаев являются недопустимым дефектом, снижающим эксплуатационные показатели конструкции и ухудшающим ее внешний вид. Поэтому при производстве многих сварных конструкций возникает необходимость их снижения до значений, обусловленных техническими условиями на изготовление конструкции. Другими словами, возникает производственная необходимость управлять развитием сварочных деформаций и напряжений, чтобы получить оптимальное их значение.

По вопросам сварочных деформаций и напряжений имеются различные классификации методов их снижения. Рассмотрим классификацию, основанную на принципиальных возможностях предупреждения и устранения их.

Методы предупреждения:

- регулирование теплового состояния металла сварного соединения при сварке;
- активное нагружение свариваемых элементов в процессе сварки;
- компенсация деформаций.

Регулирование теплового состояния металла при сварке можно достичь интенсивным теплоотводом от зоны шва, а также применением сварки концентрированными источниками нагрева.

Среди наиболее известных способов активного нагружения отметим растяжение деталей в процессе сварки, сопутствующую вибрационную и ультразвуковую обработку.

Компенсация деформаций может быть достигнута рациональным конструированием, применением рациональной последовательности сборки и сварки конструкции, закреплением изделий в процессе сварки в приспособлениях, созданием предварительной деформации конструкции, обратной сварочной.

Методы устранения:

- силовое (механическое) воздействие на сварное соединение внешними силами;
- тепловое воздействие на сварное соединение.

Силовое воздействие на сварное соединение может быть осуществлено растяжением сварного соединения, прокаткой роликами зоны шва, вибрационной или взрывной обработкой зоны шва.

Среди способов теплового воздействия наиболее распространенными являются термообработка, термофиксация и термическая правка сварного соединения.

Вследствие сварочных деформаций возможны искажения геометрических сечений элементов и конструкций в целом. Это явление может привести к появлению неучтенных напряжений при эксплуатации конструкции и выходу её из строя. Искажение формы изделия может существенно изменить эксплуатационные характеристики сварного изделия, кроме того, остаточные деформации ухудшают внешний вид изделия.

Рассмотрим возникающие сварочные деформации на примере сварной авиационной конструкции, свариваемой аргонодуговой сваркой с вращающейся дугой.

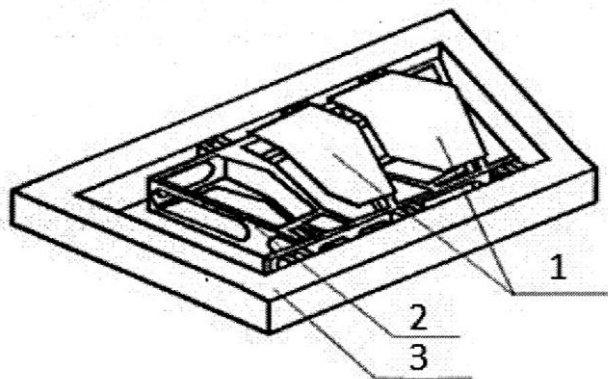
Аргонодуговая сварка с вращающейся дугой представляет собой способ сварки с обширным неравномерным тепловложением в зону шва. Изделие имеет протяженные швы сложной криволинейной конфигурации. Размеры поперечного сечения швов также различны. Это связано с широким диапазоном свариваемых толщин.

Причины возникновения сварочных усадочных деформаций в сварной авиационной конструкции:

- литейная усадка шва при кристаллизации;
  - структурные превращения, происходящие в металле в результате нагрева и охлаждения.
- Кроме того, на величину сварочных деформаций влияют следующие факторы:
- способ сварки;

- размеры швов;
- условия закрепления конструкции.

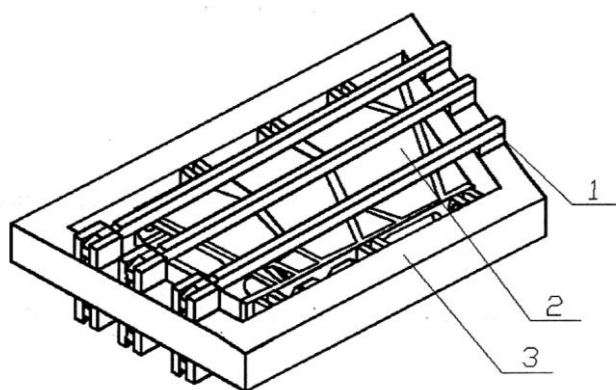
Каркас сварной авиационной конструкции жестко крепится в стапеле. Панели обшивки закладываются в проемы каркаса с максимально допустимым зазором 0,2 мм (рис. 1).



**Рис. 1. Условие закрепления сварной авиационной конструкции:**  
1 – панели, 2 – каркас; 3 – стапель

В качестве экспериментальной части были сделаны замеры размеров контуров готовых обшивок сварной авиационной конструкции, собранных и сваренных ранее различными технологическими приемами сварки.

Для замеров деформаций контура сварная авиационная конструкция после окончания сварочных работ закладывалась в специальный стенд. С верхней и нижней сторон каркаса на стенде располагаются измерительные рубильники вдоль третьего, шестого и девятого элемента поперечного силового набора (рис. 2). Сварная авиационная конструкция размещалась между рубильниками, выдерживая размерный зазор между контурами верхними и нижним рубильником  $5 \pm 1$  мм. После установочных работ проводятся замеры расстояния от контура сварной авиационной конструкции до верхнего и нижнего рубильника.



**Рис. 2. Специальный измерительный стапель:**  
1 – измерительные рубильники; 2 – сварная авиационная конструкция;  
3 – каркас измерительного стапеля

Порядок выполнения замеров:

1. Закладываем сварную авиационную конструкцию в измерительный стапель (рис. 2).
2. Выставляем сварную авиационную конструкцию по рубильникам, выдерживая равномерный зазор по верху и низу.
3. Закрепляем конструкцию прижимами стапеля, не создавая напряжений.

4. Выполняем замеры контура сварной авиационной конструкции по верхнему и нижнему рубильникам стапеля.

Приведем результаты замеров сварной авиационной конструкции по шестому элементу поперечного силового набора (рис. 3):

- варка панелей выполнена ручной аргодуговой сваркой;
- варка панелей выполнена автоматической аргодуговой сваркой без присадочной проволоки;
- варка панелей выполнена автоматической аргодуговой сваркой с применением присадочной проволоки.

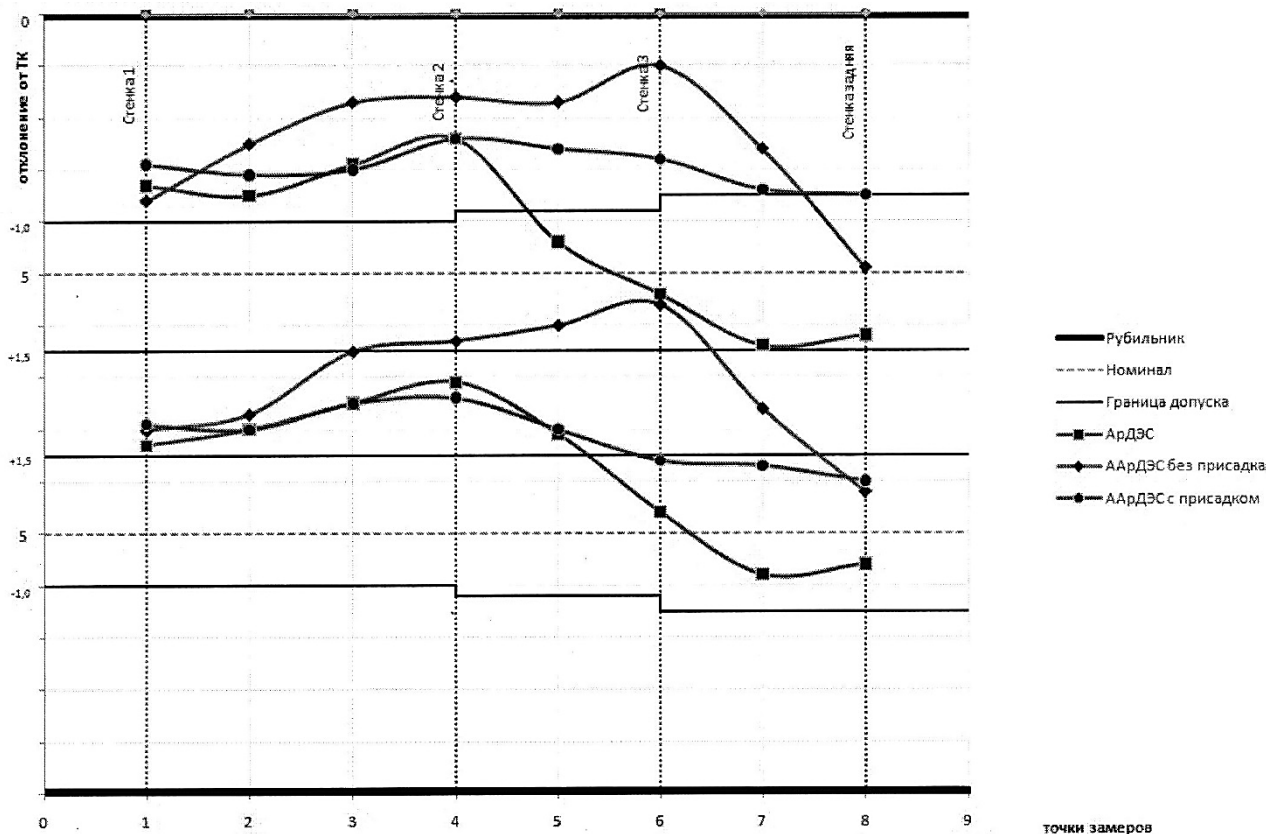


Рис. 3. Модель деформаций контура сварной авиационной конструкции

Анализируя полученные результаты измерений и построенный график, делаем выводы. Деформационные изменения контура исследуемого изделия выходят за пределы допустимых значений. Технологическими причинами возникновения сварочных усадочных деформаций являются:

- большое местное тепловложение в зонах перехода с одной толщины на другую;
- различный теплоотвод каждого участка шва, связанный с криволинейной конфигурацией шва;
- недостаточная жесткость прихватки.

В процессе исследования отклонений теоретического контура сварной авиационной конструкции был проведен анализ влияния ряда технологических приемов.

В результате были сделаны следующие выводы:

1. Было достигнуто снижение отклонений до 2,5 мм от теоретического контура.
2. Было установлено, что сварка дает всего лишь 30% полученных деформаций по изготовлению сварной авиационной конструкции, остальной процент приходится на сборочные операции.

Для дальнейшего снижения отклонений необходимо:

- применение автоматической аргодуговой сварки с присадочной проволокой;
- изменение конструкции, а именно, увеличение толщины полок каркаса сварной авиационной конструкции в зонах сварного шва;
- определение деформаций при сварке элементов каркаса и каркаса в целом;
- применение технологического комплекса измерений и инспекционного контроля на основе бесконтактных оптических систем оцифровки и измерений, что позволит наиболее точно определить деформации как отдельных элементов, так и конструкции в целом.

#### Библиографический список

1. **Винокуров, В.А.** Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
2. **Баранов, М.С.** Технология производства сварных конструкций / М.С. Баранов. – М.: Машиностроение, 1966. – 332 с.
3. **Мавлютов, Р.Р.** Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций / Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1981. – 141 с.

*Дата поступления  
в редакцию 10.06.2014*

**В.Р. Konishchev<sup>1</sup>, Е.А. Pigalova<sup>2</sup>, N.A. Kurnikov<sup>2</sup>**

#### **DYNAMICS OF WELDING STRAINS ON THE BASIS OF EMPIRICAL DATA AND APPLICATION OF TECHNOLOGICAL RECEPTIONS OF DECREASE STRAIN DEVIATIONS OF WELDED CONTOUR OF AVIATION CONSTRUCTIONS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC NAP «Sokol»<sup>2</sup>

The article deals with problems of origination of residual strain and stress. The measuring technique of strain of the welded contour of aviation construction is given. The influence of technological receptions on variation of values of strain deviations of welded contour of aviation construction is studied.

*Key words:* residual strain and stress, welded aviation construction, methods of prevention welding deformations.