

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.791

И.К. Козлов, А.С.Трофимов

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено экспериментальное исследование процесса нагрева при формировании сварного соединения в процессе изготовления круглозвенных цепей контактной стыковой сваркой. Установлен характер распределения тока по сварочным и шунтирующим цепям, особенности его изменения в процессе сварки. Разработана методика и программа моделирования термомеханического процесса при контактной стыковой сварке сопротивлением.

*Ключевые слова:* контактная сварка, регистрация процессов, термомеханическое состояние, сварная цепь.

Контактная стыковая сварка применяется во многих отраслях промышленности. С ее помощью свариваются трубопроводы, арматурные стержни железобетонных изделий, железнодорожные рельсы (бесстыковые пути), длинномерные заготовки из различных конструкционных сталей и цветных металлов, сварные цепи. Из существующих разновидностей контактной стыковой сварки (оплавлением и сопротивлением) наибольший интерес представляет контактная стыковая сварка сопротивлением (Ксс). По сравнению со стыковой контактной сваркой оплавлением (Ксо) данный вид сварки обладает следующими преимуществами:

- отсутствие интенсивного искрообразования, угара и брызг металла;
- более высокий коэффициент использования металла;
- высокая производительность и относительно низкая энергоемкость процесса;
- простота, гигиеничность и более низкая стоимость оборудования.

Основными недостатками Ксс являются:

- необходимость в более тщательной подготовке торцевых поверхностей и мест токоподвода;
- получение качественных сварных соединений изделий сечением до 300 мм<sup>2</sup> (условного диаметра до 20 мм).

В процессе сварки ток протекает через предварительно сжатые торцы деталей, нагревая приконтактную зону до температур 1200-1350°C. Нагрев зоны термомеханического влияния (в дальнейшем ЗТМВ) приводит к значительному снижению сопротивления металла пластическому деформированию. Приложенное усилие сжатия, в соответствии с заданным характером изменения, обеспечивает интенсивную пластическую деформацию металла в ЗТМВ и обеспечивает формирование сварного твердофазного соединения. Принципиальная схема процесса сварки круглозвенных цепей приведена на рис. 1.

Определяющим фактором процесса нагрева является не только значение сварочного тока, но циклограмма его изменения. Получение качественных сварных соединений возмож-

но только при условии локализации зоны тепловыделения и соответственно локализации интенсивной пластической деформации непосредственно в зоне контакта свариваемых поверхностей. Увеличение размеров зоны прогрева выше предельных значений приведет к смещению зоны интенсивной пластической деформации от стыка, в зоне стыка формируется зона торможения, и качественное сварное твердофазное соединение не формируется.

При производстве цепей принята двух и трех стадийная циклограмма процесса. На первой стадии значение сварочного тока максимально, на второй и третьей стадиях сварочный ток и длительность его протекания существенно ниже. Основной прогрев и формирование ЗТМВ происходит на первой стадии, последующие несколько «смягчают» жесткость режима первой стадии. Чрезмерное увеличение длительности второй и третьей стадий ведут к опасности увеличения размеров ЗТМВ и снижению интенсивности пластической деформации в зоне стыка.

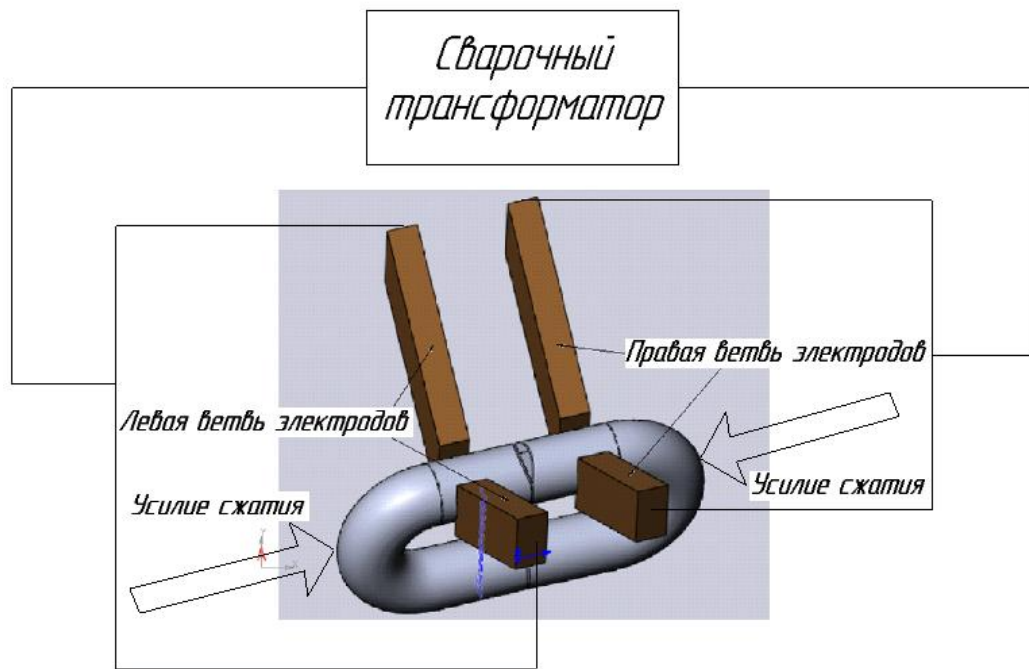


Рис. 1. Принципиальная схема сварки круглозвенных цепей

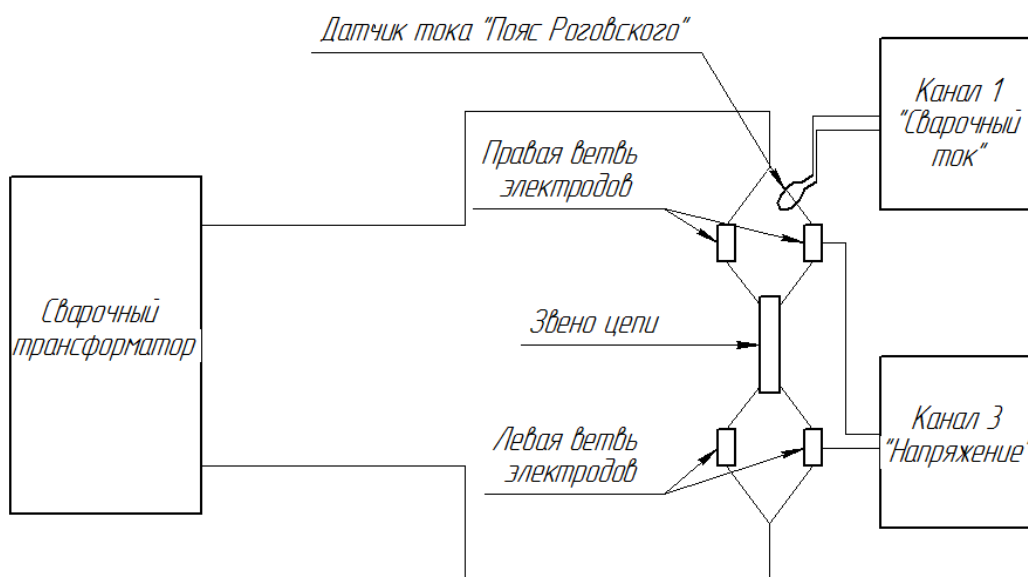
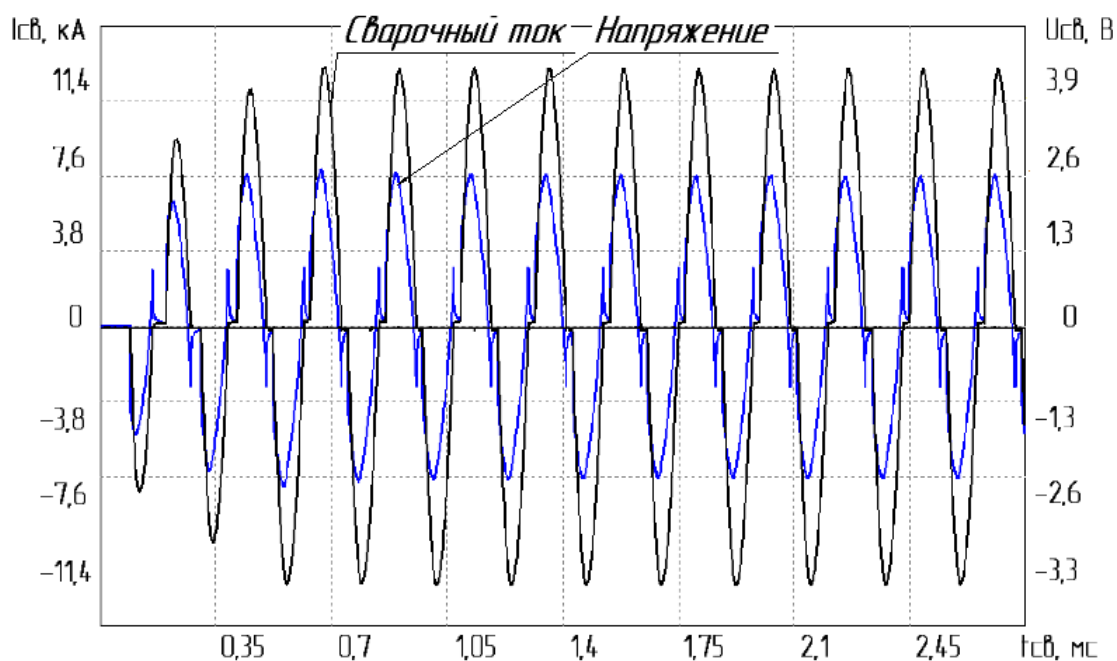


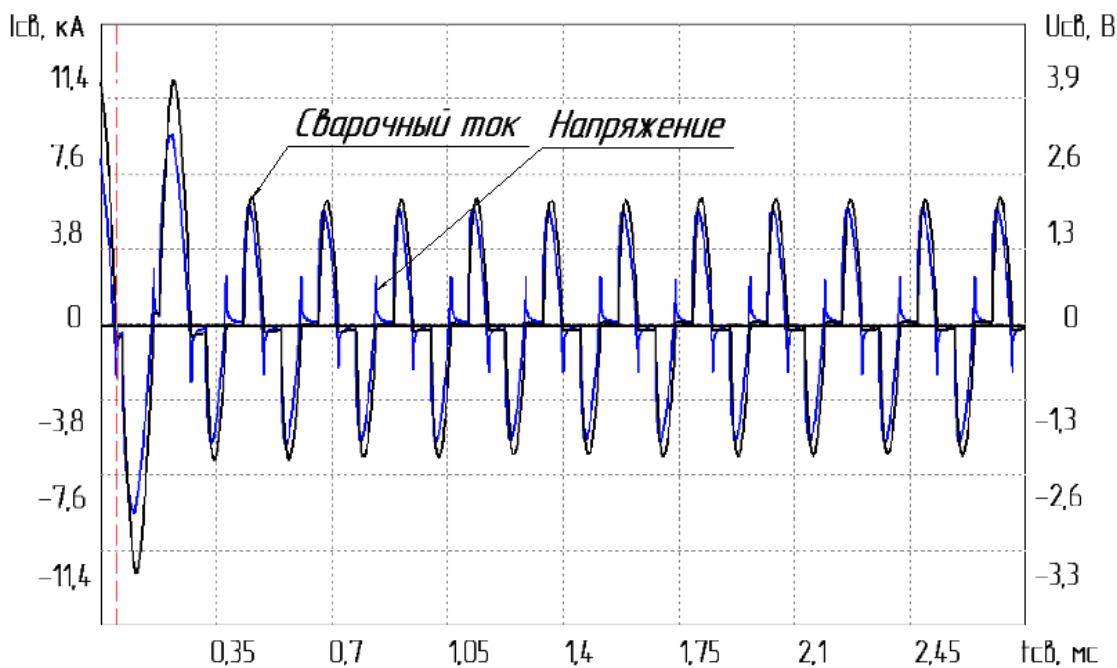
Рис. 2. Схема подключения МРС-02У и датчика тока

Проведенные исследования ставили задачу мониторинга процесса сварки, в том числе регистрацию и измерения реальных значений сварочного тока, его длительности и циклограммы процесса. Электрические параметры процесса сварки, а именно сварочный ток, а так же падение напряжения на вторичном контуре фиксировали при помощи мобильного регистратора МРС-02У. В качестве датчика тока использовали “пояс Роговского”. Схема подключения МРС-02У и датчика тока показана на рис. 2.

Регистрация производилась на машине переменного тока фирмы Wafios модели КЕН-8 при сварке цепи типоразмера 20x80 (рис. 3) и на машине постоянного тока фирмы Vitari модель SH-2 при сварке цепи типоразмера 13x39 (рис. 4), как при максимальном потреблении энергии в цеху, так и во время обеденного перерыва. Результаты измерений с машины КЕН-8 сведены в табл. 1, а машины SH-2 в табл. 2.



а)



б)

Рис. 3. Регистрограммы тока и напряжения для стадии 1 (а) и стадии 2 (б) (машина КЕН-8)

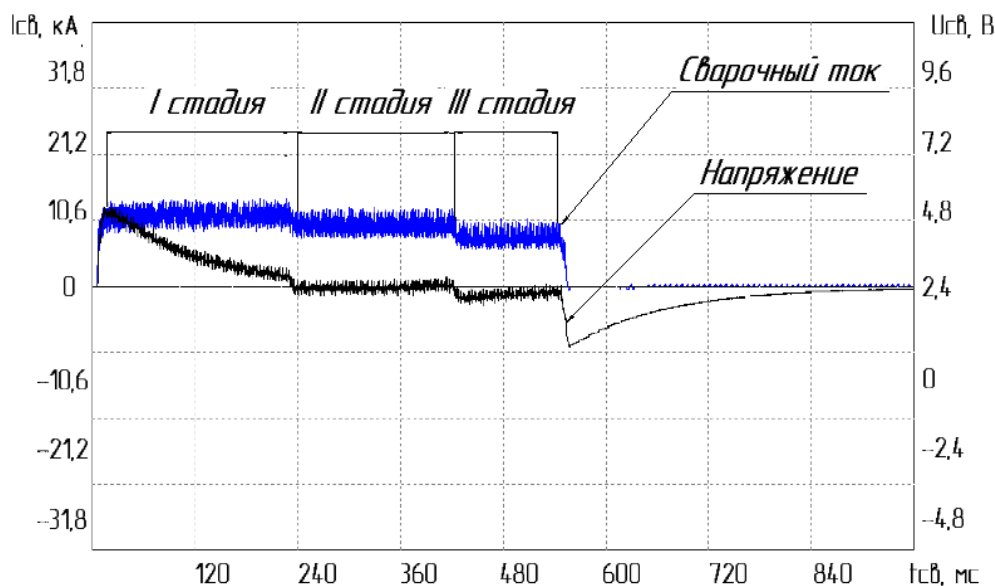
При сварке на переменном токе, за счет фазовой регулировки его значений, возможны перерывы прохождения тока. Это приводит не только к пульсирующему характеру нагрева, но и значительно большему, чем в случае сварки на постоянном токе, уходу теплоты из ЗТМВ.

**Таблица 1**

**Результаты измерений сварочного тока, времени его протекания и напряжения на вторичном контуре (машина КЕН-8)**

Характер замера	Стадия I				Стадия II			
	$I_{св1}$ , кА	$U_1$ , В	$t_1$ , мс	Перерыв прохождения тока за половину периода, мс	$I_{св2}$ , кА	$U_2$ , В	$t_2$ , мс	Перерыв прохождения тока за половину периода, мс
В обеденный перерыв с первого электрода правой ветви	13,2	2,6	1360	1,6	5,6	1,5	560	4,6
В рабочее время с первого электрода правой ветви	12,5	2,5	1360	1,6	5,5	1,4	560	4,6
В рабочее время со второго электрода правой ветви	15,2	3,7	1360	1,5	6,7	2,1	560	4,6

Анализируя полученные результаты необходимо отметить, что имеется неравномерное распределение сварочного тока, проходящего через сварочные электроды правой и левой ветвей, а также снижение электрических параметров в рабочее время относительно значений, снятых в обеденный перерыв. После визуального осмотра токопроводящих элементов вторичного контура было замечено частичное разрушение гибких токопроводящих шин, причем разрушение на четырех гибких шинах неодинаково, что и вызывает неравномерное распределение тока в ветвях. Вследствие частичного разрушения гибких токопроводящих шин их активное сопротивление увеличивается, в результате чего в процессе сварки происходит их перегрев. Замером пирометром была установлена температура нагрева шин, которая варьировалась от 100 до 150°C.



**Рис. 4. Регистрограмма тока и напряжения, (машина SH-2)**

Таблица 2

Результаты измерений сварочного тока, времени его протекания и напряжения во вторичном контуре (машина SH-2)

Условия измерения	Стадия I			Стадия II			Стадия III		
	$I_{св1}$ , кА	$U_1$ , В	$t_1$ , мс	$I_{св2}$ , кА	$U_2$ , В	$t_2$ , мс	$I_{св3}$ , кА	$U_3$ , В	$t_3$ , мс
В рабочее время	10,6	2,7	240	7,5	2,4	200	6	1,9	120

По имеющимся данным был произведен теоретический расчет количества теплоты затрачиваемого и требуемого для нагрева металла между электродами ( $L_{уст}$ ) до температуры 800°C. Для машины КЕН-8 полные значения сварочного тока и напряжения были получены путем сложения их составляющих, измеренных на противоположных электродах в процессе работы, а для машины SH-2 путем увеличения их в два раза. Результаты расчета представлены в табл. 3. Расстояние между электродами соответственно 27 и 12,5 мм для машин КЕН-8 и SH-2.

Таблица 3

Результаты расчета количества теплоты требуемого и затрачиваемого на нагрев зоны термомеханического влияния

Машина	Параметры режима		Выделившееся количество энергии, кДж	Потеря энергии в результате шунтирования сварочного тока, кДж	Количество теплоты для нагрева $L_{уст}$ , кДж	Количество теплоты затрачиваемое на нагрев $L_{уст}$ , кДж
КЕН-8	$I_1$ , А	27 200	253	105	36	36
	$U_1$ , В	6,2				
	$t_1$ , с	1,36				
	$I_2$ , А	12 100				
	$U_2$ , В	3,5				
	$t_2$ , с	0,56				
SH-2	$I_1$ , А	21 200	47	13	7	8
	$U_1$ , В	5,4				
	$t_1$ , с	0,24				
	$I_2$ , А	15 000				
	$U_2$ , В	4,8				
	$t_2$ , с	0,2				
	$I_3$ , А	12 000				
	$U_3$ , В	3,8				
$t_3$ , с	0,12					

Была разработана математическая модель термодформационного состояния деталей в процессе сварки (рис. 5), адекватность которой проверяли, сравнивая результаты моделирования с фактическими значениями температур и деформации в ЗТМВ.

Основу математической модели процесса контактной стыковой сварки сопротивлением послужила методика, разработанная для процесса рельефной сварки [6].

Математическая модель процесса включает в себя подмодели электрического поля, температурного поля и подмодель процесса пластической деформации, которые рассматриваются во времени последовательно, что позволяет учесть их взаимосвязь. Моделирование процесса на основе указанной модели производилось методом конечных разностей для принятой линейной модели. Свариваемые детали плоскостями, перпендикулярными оси симметрии детали разбивались на слои высотой равной  $h_{i,t}$ .

В пределах элементарного шага по времени  $\Delta t$  определялась величина осадки рассматриваемого слоя. В процессе расчета, исходя из значения приложенного сварочного усилия  $P_{CB}$ , производилось вычисление средних значений удельного усилия в слоях  $\sigma_{i,t}^{(p)}$ .

Значение  $\sigma_{i,t}^{(p)}$  в процессе расчета сравнивалось со значением удельного усилия, необходимого для осадки слоя при скорости осадки  $V=1\text{с}^{-1}$ .

В случае, если значение  $\sigma_{i,t}^{(p)}$  превышает значение  $\sigma_{i,t}^{(1)}$  считается, что имеет место пластическая деформация слоя, величина которой определяется из условия, что отношение  $\sigma_{i,t}^{(p)}/\sigma_{i,t}^{(1)}$  равно значению скоростного коэффициента  $K_v$ .

Для углеродистых стали значение  $K_v$  определяется из выражения

$$K_v = (\ln(h_0/h)/t_{\text{деф}})^{0,125}. \quad (1)$$

В процессе сварки происходит изменение размеров слоев - их толщины  $h_{i,t}$  и площади поперечного сечения  $S_{i,t}$ .

$$S_{i,t+\Delta t} = S_{i,t} \exp\left(\left(\frac{\sigma_{i,t}^{(p)}}{\sigma_{i,t}^{(1)}}\right)^8 \cdot \Delta t\right); \quad h_{i,t+\Delta t} = h_{i,t} \exp\left(\left(\frac{\sigma_{i,t}^{(p)}}{\sigma_{i,t}^{(1)}}\right)^8 \cdot \Delta t\right). \quad (2)$$

Введем переменные

$$A = \frac{(S_{j-1,t} + S_{j,t})h_{i,t}}{S_{j,t}(h_{i-1,t} + h_{i,t})}; \quad B = \frac{(S_{j+1,t} + S_{j,t})h_{i,t}}{S_{j,t}(h_{i+1,t} + h_{i,t})}; \quad C = \frac{\lambda \Delta t}{c \gamma h_{i,t}^2} = \frac{a \Delta t}{h_{i,t}^2}. \quad (3)$$

Значение температуры в слое, с учетом тепловыделения в слое от мгновенного значения сварочного тока  $I_{\text{МГН}}$  и с учетом зависимости  $(\rho/c\gamma)$  от температуры, определяется по формуле

$$T_{i,t+\Delta t}^{(\lambda)} = T_{i,t} + G[(T_{i-1,t} - T_{i,t})A + (T_{i+1,t} - T_{i,t})B] + (I_{\text{МГН}})^2 (\rho/c\gamma)_0 (1 + \beta T_{i,t}) \Delta t / (S_{j,t})^2. \quad (4)$$

Для выполнения второго закона термодинамики необходимо

$$\frac{1}{AG} - 1 - \frac{B}{A} \geq 0. \quad (5)$$

Выражение (5) используется для проверки устойчивости решения на каждом шаге вычислений и, в случае необходимости, служит основанием для уменьшения величины шага по времени.

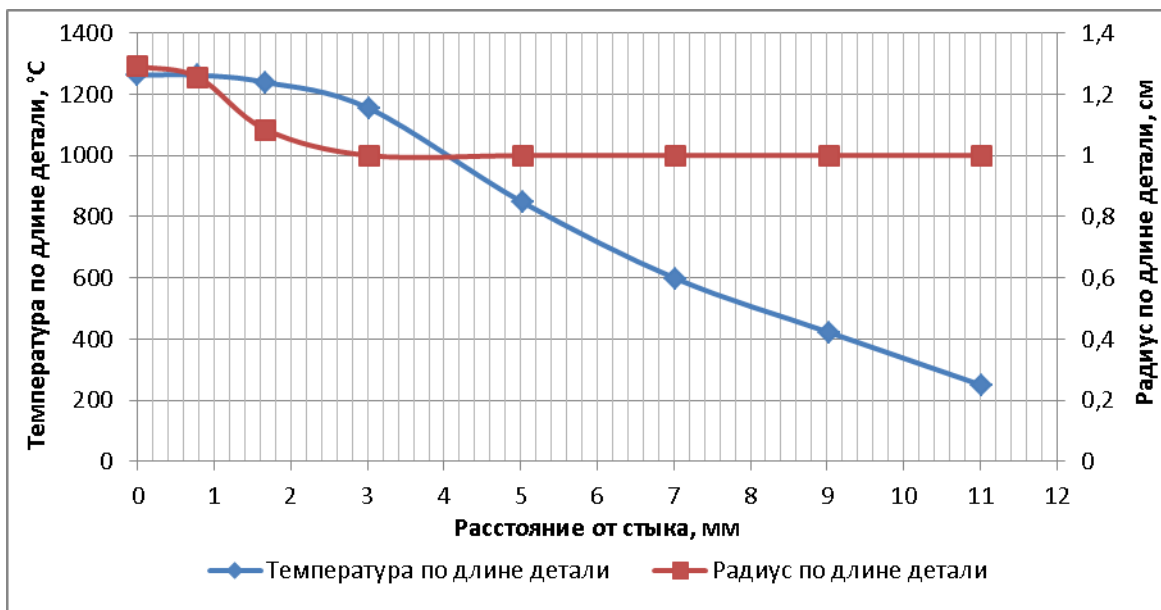


Рис. 5. Распределение температуры и радиуса поперечного сечения по длине детали в конце сварки (типоразмер 20x80, машина КЕН-8)



Рис. 6. Сваренное звено цепи 20x80 без обрезки грата

### Выводы

1. Получение качественных сварных соединений возможно только при условии локализации зоны тепловыделения и соответственно локализации интенсивной пластической деформации непосредственно в зоне контакта свариваемых поверхностей. Увеличение размеров зоны прогрева выше предельных значений приведет к смещению зоны интенсивной пластической деформации от стыка, в зоне стыка формируется зона торможения, и качественное сварное твердофазное соединение не формируется.

2. Имеет место несимметричное распределение тока в сварочных электродах правой и левой ветвей и соответственно к неравномерности прогрева ЗТМВ, что связано с износом и частичным разрушением токопроводящих гибких шин вторичного контура.

3. При сварке на переменном токе за счет фазовой регулировки его значения возможны перерывы прохождения тока. Это приводит не только к пульсирующему характеру нагрева, но и значительно большему, чем в случае сварки на постоянном токе, уходу теплоты из ЗТМВ.

4. Разработана математическая модель термодформационного состояния деталей в процессе стыковой сварки сопротивлением, что обеспечило возможность моделирования процесса.

### Библиографический список

1. **Смирнов, В.В.** Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / В.В. Смирнов; под ред. В.В. Смирнова. – СПб.: Энергоиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. – 848 с.
2. **Банов, М.Д.** Технология и оборудование контактной сварки: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М.Д.Банов. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр “Академия”, 2008. – 224 с.
3. **Чуларис, А.А.** Технология сварки давлением / А.А. Чуларис, Д.В. Рогозин. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 221 с.

4. **Козлов, И.К.** Особенности мониторинга процесса сварки и состояния сварочного оборудования // Сварка и диагностика. – 2013. – №4. – С. 59–62.
5. **Коновалов, Н.А.** Прогнозирование качества сварных соединений по данным мониторинга процесса контактной стыковой сварки оплавлением / Н.А. Коновалов, В.А.Ерофеев, С.И. Полосков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – №1. – С. 73–81.
6. **Козлов, И.К.** Область применения и оптимизация технологии рельефной Т-образной сварки. Фундаментальные исследования. – М. – 2013. – № 11 (часть 5). – С. 875–879.

*Дата поступления  
в редакцию 10.05. 2016*

**I.K. Kozlov, A.S. Trofimov**

## **RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE HEATING PROCESS RESISTANCE BUTT WELDING**

The Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

**Purpose:** The study of metal heating and deformation process when forming a join by the butt resistance welding method.

**Approach:** The results of the welding process monitoring are introduced, including registration and measuring of the actual welding current data and the sequence diagram, also the results of the study of metal heating and plastic deformation process.

**Findings:** Heat penetration zone uprising over the limit values leads to a shift of the intensive plastic deformation area away from the butt, in the butt area a braking area is formed, and no quality weld join is formed by solid phase.

**Research implications:** The obtained research results demonstrate the new optimization method of butt resistance welding technological process. The method is based on the thermal deformation state of the thermal-mechanic effect area modeling.

**Value:** A mathematic model of the components thermal deformation state in the resistance butt welding process was designed, that made the modeling process possible.

*Key words:* resistance welding, registration processes, thermal deformation, welding chains.