

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
оборудования

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Стабильность качества контактной сварки в условиях возмущений

Студент(ка)	<u>О.А. Смиркин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>А.С. Климов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>Т.А. Варенцова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы: д.т.н, профессор В.В. Ельцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____
(личная подпись)
« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н, профессор В.В. Ельцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____
(личная подпись)
« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Анализ современного состояния вопроса обеспечения качества при контактной сварке	
1.1 Обзор возмущений при контактной сварке.	7
1.2 Типовые детали и особенности технологии сварки	18
1.3 Обзор систем управления и контроля контактной точечной сваркой	26
1.4 Формулировка задач диссертационного исследования.	28
2 Контроль качества контактной сварки в условиях возмущений	
2.1 Общая постановка вопроса	30
2.2 Капиллярные методы контроля	31
2.3 Оптические методы контроля	32
2.4 Вихретоковые методы контроля	34
2.5 Магнитные методы контроля	35
2.6 Электрические методы контроля	38
2.7 Радиационные методы контроля	39
2.8 Акустические методы контроля	40
2.9 Выбор методики неразрушающего контроля	42
3 Анализ износа сварочных электродов как возмущающего фактора при контактной точечной сварке	
3.1 Общая постановка вопроса	44
3.2 Особенности эксплуатации сварочных электродов в условиях массового производства	47
3.3 Компенсация износа электродов в условиях массового производства	52
4 Автоматическое управление	

контактной точечной сваркой в условиях возмущений	
4.1 Обзор способов управления контактной сваркой в условиях действия возмущений	54
4.2 Система автоматического управления контактной сваркой в условиях возмущений	59
4.3 Устройство для компенсации износа электродов при контактной точечной сварке	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	72

ВВЕДЕНИЕ

Контактная электросварка нашла широкое применение в различных отраслях промышленности: авиационной, автомобильной, приборостроительной и т. д., что объясняется простотой автоматизации, высокой производительностью и хорошим внешним видом сварных соединений.

Качество соединений, выполняемых точечной контактной сваркой, в значительной мере зависит от степени совершенства аппаратуры управления сварочной машиной. Высококачественное сварное соединение может быть получено только при использовании электронной аппаратуры управления, имеющей высокую точность и обладающей широкими возможностями для задания различных технологических циклов. Наибольшие возможности дает программное управление процессом сварки, позволяющее изменять различные параметры (ток, напряжение, давление между электродами и т. д.) по наперед заданному оптимальному закону.

В работах Тельмана А.С., Орлова Б.Д., Подолы П.В., Чакалева А.А., Чулошникова П.Л. и др. показано, что причиной возникновения дефектов точечносварных соединений является нестабильность параметров процесса. Наиболее сильными возмущениями, вызывающими нестабильность параметров точечной сварки, являются: нагревание токоведущих деталей сварочной машины, изменение массы ферромагнитных тел в ее контуре, трение в механизме сжатия электродов, сопротивление свариваемых деталей сжатию, износ рабочих поверхностей электродов машины, плохая очистка поверхности свариваемых деталей, шунтирование. Уровень возмущений неодинаков в различных отраслях промышленности, при сварке сплавов различных марок и при сварке деталей различной толщины, Стабильность размеров и литого ядра неодинакова при сварке на различных режимах и использовании машин различных типов и зависит от геометрии электродов.

Для устранения влияния различных возмущений на процесс сварки необходимы обратные связи, обеспечивающие автоматическое изменение режима и, как следствие, стабилизацию прочностных характеристик сварных соединений [3].

Размер этой зоны при точечной сварке определяется диаметром литого ядра и регламентируется ГОСТ 15878–79 «Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры» [46]. Качество контактной точечной сварки зависит от многих факторов, в первую очередь от выбранной технологии, применяемого оборудования и автоматического контроля процесса в реальном времени [1, 3, 4].

Основными дефектами контактной точечной сварки можно назвать [4, 6, 14] непровар, выплеск, трещины, раковины и отклонение геометрических параметров сварного соединения. Непровар является одним из самых опасных дефектов и может проявляться в виде полного отсутствия или уменьшения литого ядра, а также при частичном или полном сохранении оксидной пленки или плакирующего слоя в контакте деталь–деталь.

Для повышения качества сварных соединений применяются различные технологические циклы. Простейший цикл характеризуется постоянными во времени величинами: усилием сжатия электродов и эффективным значением сварочного тока, а также длительностью протекания тока. Однако зачастую возникают случаи, при которых не удается удовлетворительно сварить детали по такой программе. В ряде случаев необходимо плавное нарастание тока, например, для сварки горячекатанного металла без удаления окалины, металлов с гальваническим покрытием и т. д.

При контактной сварке в ряде случаев для уплотнения литого ядра и устранения пор применяется ковочное давление и плавное уменьшение тока. Часто используются более сложные технологические циклы, состоящие из предварительного подогрева, паузы, сварочного импульса и термообработки. Большое внимание уделяется вопросам программирования при точечной сварке металлов малых толщин, широко применяемых в

приборостроительной и электронной технике. Существующие типы стандартного оборудования, как правило, не позволяют задавать различные сложные технологические циклы. Возникает необходимость в создании универсальных прецизионных программируемых устройств.

Таким образом, следует указать на три составляющих, которые и будут определять качество контактной сварки:

- возмущения технологического процесса при контактной точечной сварке;
- контроль качества соединений, выполненных контактной точечной сваркой;
- управление контактной точечной сваркой в условиях возмущений.

Исследованию этих составляющих посвящена настоящая диссертация, в которой поставлена актуальная **цель**: повышение производительности и качества контактной точечной сварки в условиях действия возмущений.

1 Анализ современного состояния вопроса обеспечения качества при контактной сварке

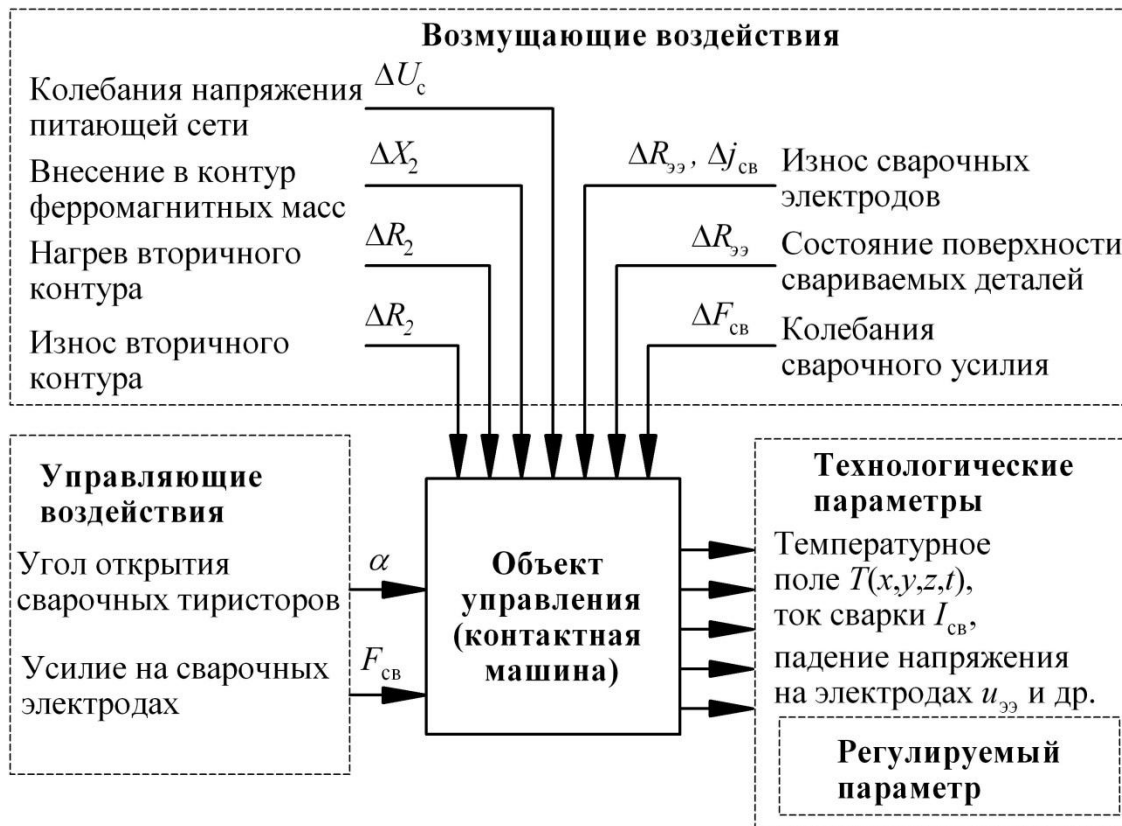
1.1 Обзор возмущений при контактной сварке

В ходе выполнения процесса контактной точечной сварки предполагается получение точечного сварного соединения, имеющего заданные геометрические размеры. Геометрия сварной точки в этом случае определяется протеканием тока сварки и вызываемым им нагревом, в результате чего формируется температурное поле, обеспечивающее заданные размеры литой зоны. Также изменяющееся во времени температурное поле должно способствовать протеканию необходимых металлургических изменений в зоне термического влияния, что позволяет достигнуть сварным соединением заданных свойств.

При жёстком программировании параметров процесса контактной точечной сварки не удаётся управлять температурным полем, а значит, получение стабильного качества сварки в условиях возмущений невозможно. Такими возмущениям (рис. 1.1, рис. 1.2) являются [47...51]:

- 1) изменение свойств соединяемых при помощи контактной сварки деталей, к которым относят: электрофизические и теплофизические характеристики материала деталей, состояние поверхностей свариваемых деталей, особенности геометрии свариваемых деталей;
- 2) изменение технологических параметров процесса контактной точечной сварки – силы сварочного тока, длительности импульса сварочного тока, сварочного усилия. Массовому производству приходится сталкиваться с фактами снижения давления в системе подачи сжатого воздуха и падения напряжения в питающей сети;
- 3) протекание монотонных изменений в электрическом и силовом контурах, возникающие из-за износа контактной машины.
- 4) условия протекания процесса контактной точечной сварки – изменяющееся полное сопротивление контактной машины, эффект

шунтирования тока, износ сварочных электродов, нагрев элементов сварочного контура контактной машины.



U_c – сетевое напряжение, X_2 и R_2 – индуктивное и активное сопротивления вторичного контура, $R_{ээ}$ – сопротивление участка «электрод-электрод»,
 $j_{св}$ – плотность сварочного тока

Рисунок 1.1 – Возмущающие воздействия φ_i процесса контактной точечной сварки

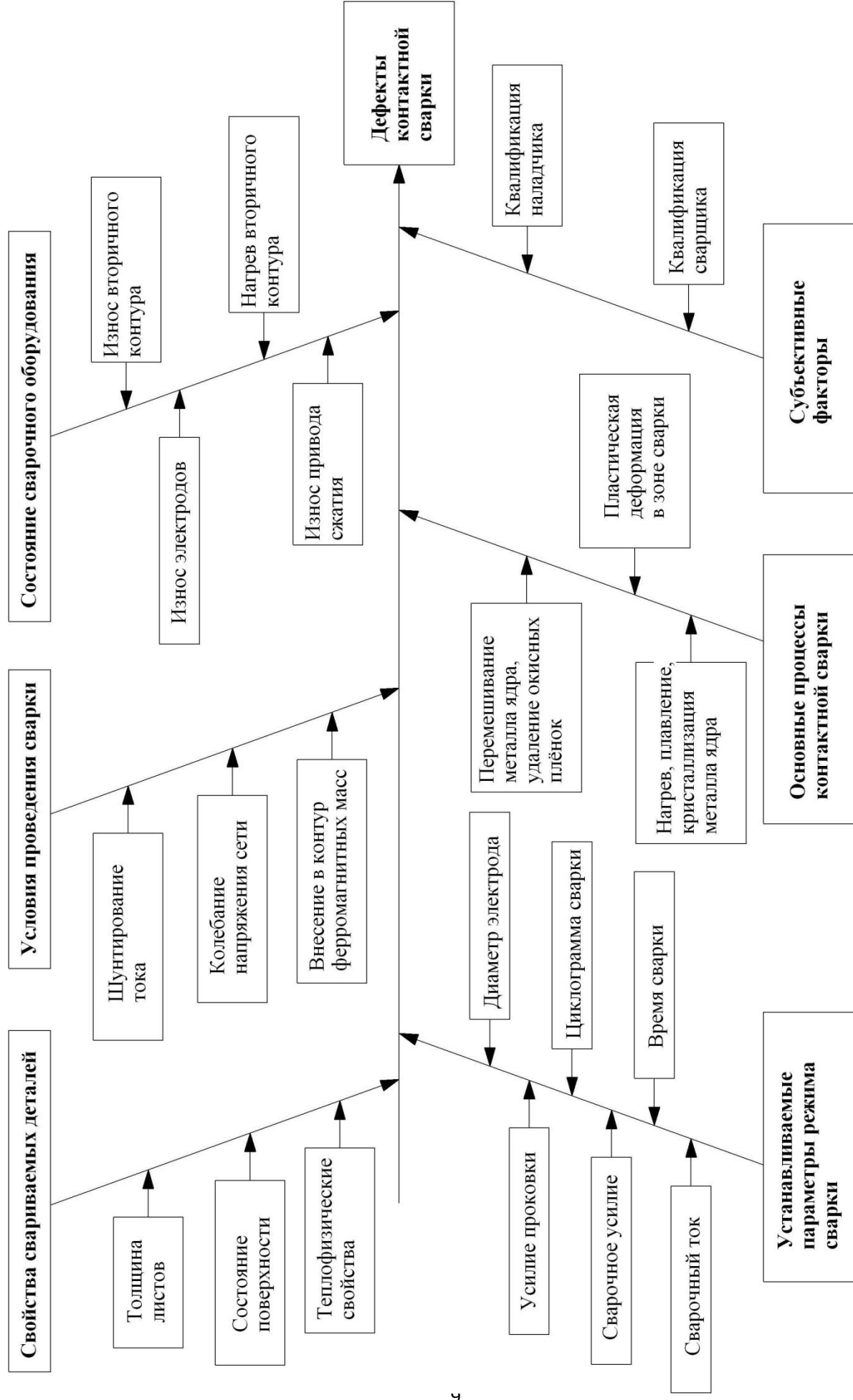


Рисунок 1.2 – Факторы, влияющие на возникновение дефектов контактной сварки

Колебания напряжения питающей сети (рис. 1.3) является самым распространённым возмущением, действующим на оборудование для контактной сварки.

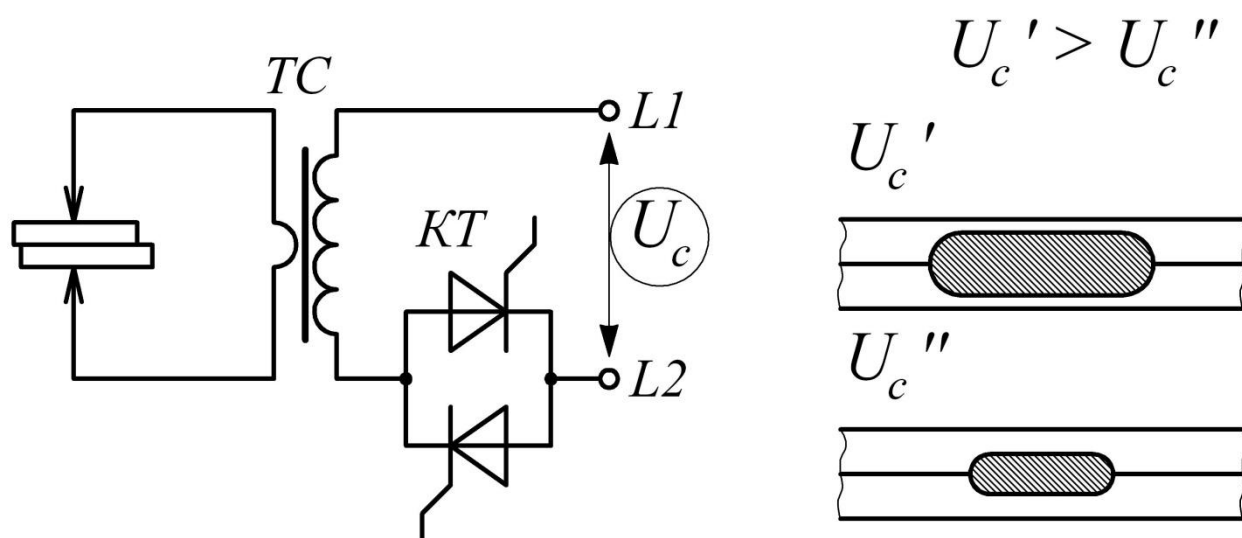


Рисунок 1.3 – Колебание напряжения питающей сети как возмущение при контактной сварке

Самым опасным следует признать уменьшение напряжения питающей сети, которое приводит к появлению непроваров и уменьшению прочности сварных точек. Повышение же напряжения питающей сети приводит к появлению выплесков жидкого металла и прожогам. Напряжение питающей сети может изменяться плавно в течение суток или скачкообразно, если происходит подключение мощных потребителей энергии. Также следует учесть влияние других потребителей на форму сетевого напряжения, например, подключение к сети сварочных выпрямителей приводит к существенному искажению синусоиды сетевого напряжения. Кратковременное изменение напряжения питающей сети лежит в диапазоне от -25 до +15 номинального. Изменение напряжения питающей сети существенно влияет на формирование соединения при контактной точечной сварке и значительной степени снижают качество выполняемых соединений. Также следует отметить влияние колебаний напряжения питающей сети на стабильность работы системы управления контактной сваркой, что может привести к нарушению цикла сварки.

Изменение сопротивления вторичного контура сварочной машины – активного (рис. 1.4) и индуктивного (рис. 1.5).

В массивных токоведущих частях вторичного контура контактных машин на величину активного сопротивления оказывает влияние поверхностный эффект от магнитных полей рассеивания. Вследствие неравномерности распределения тока по сечению элемента вторичного контура величина его активного сопротивления может повыситься на 20...25% против расчетной величины. На поверхностный эффект влияет также глубина фазового регулирования, увеличение угла открытия тиристорov вызывает повышение активного сопротивления вторичного контура контактных машин.

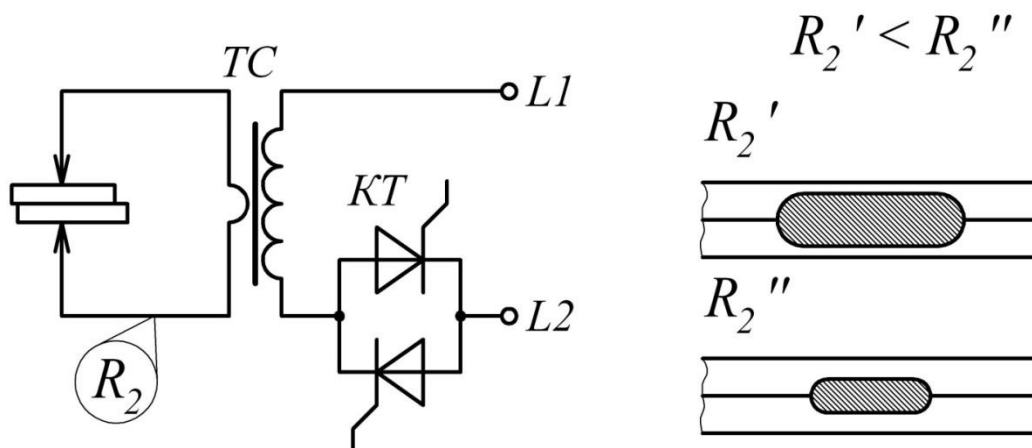


Рисунок 1.4 – Изменение активного сопротивления вторичного контура как возмущение при контактной сварке

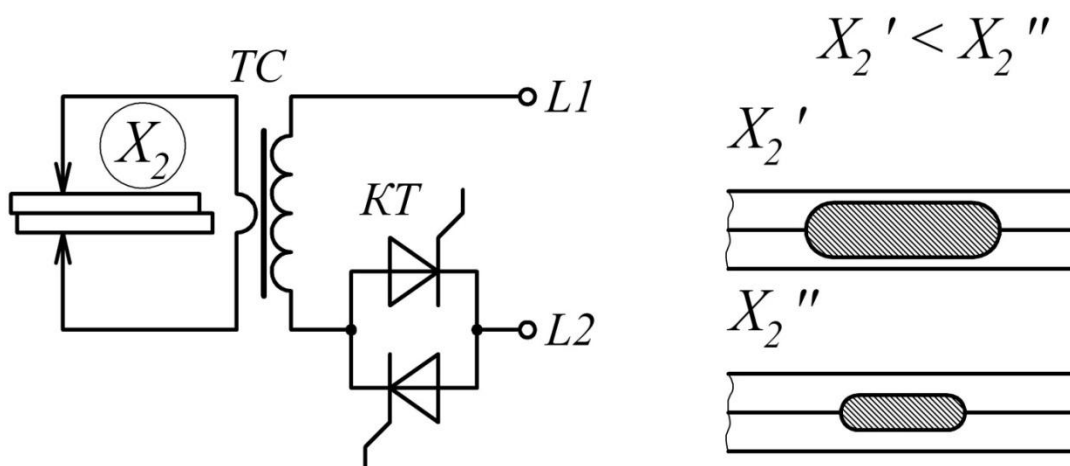


Рисунок 1.5 – Изменение индуктивного сопротивления вторичного контура как возмущение при контактной сварке

В цепи переменного тока под влиянием магнитного поля возникает ток самоиндукции, создающий индуктивное сопротивление, зависящее от величины тока, площади вторичного контура и частоты тока. В массивных токоведущих частях вторичной цепи сварочного трансформатора индуктивное сопротивление создается также вследствие поверхностного эффекта от магнитных полей рассеивания. За счет неравномерного распределения тока по сечению величина активного сопротивления повысится на 20...25% против расчетной величины. Наличие индуктивности вызывает отставание тока от напряжения соответственно углу φ . Напряжение нарастает раньше, чем ток. В машинах для контактной сварки индуктивное сопротивление весьма значительно и превышает активное сопротивление. При коротком замыкании $\cos\varphi$ снижается до 0,3...0,6.

Индуктивное сопротивление зависит от конструкции внешнего контура и наличия внутри его массы свариваемых деталей (рис. 1.6). Чем больше расстояние между плечами и вылет электродов и чем больше металла находится внутри контура, тем больше индуктивное сопротивление.

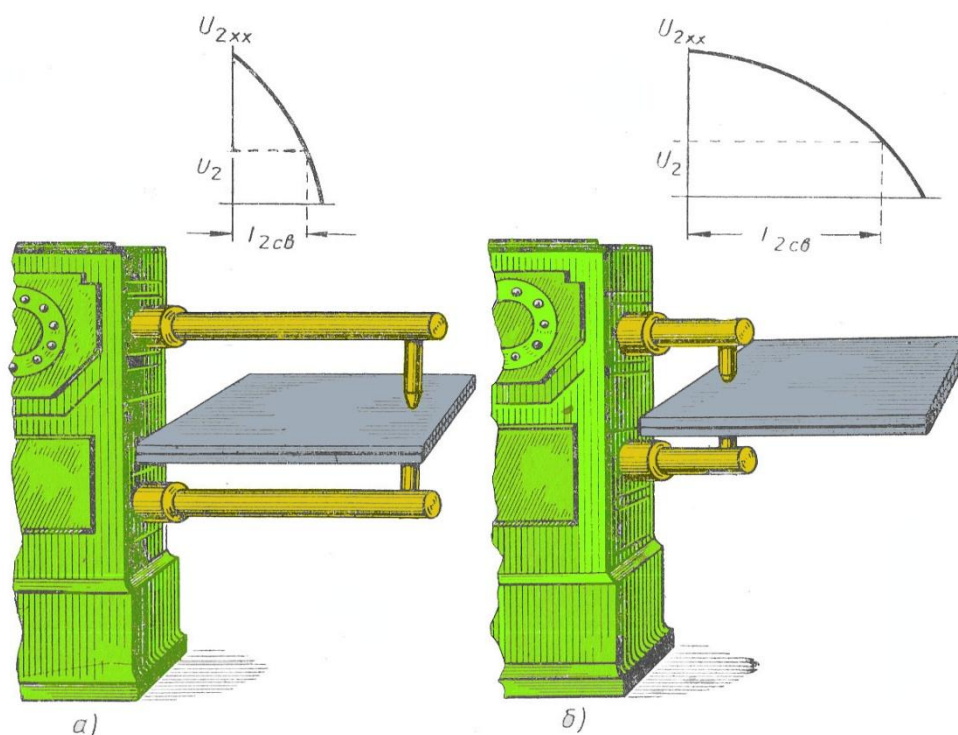


Рисунок 1.6 – Зависимость тока и индуктивного сопротивления от площади вторичного контура и объема введенного металла

Изменение условий сжатия деталей сварочными электродами. При сварке кузовных деталей необходимо считаться с тем, что на поверхности деталей после сварки остаются вмятины, образовавшиеся под действием сварочного давления на электроды и давления на проковку. Чтобы избежать отпечатков на лицевых поверхностях, применяют электроды больших диаметров и располагают их со стороны этих поверхностей или косвенную сварку. На качество сварки значительное влияние оказывает качество сборки конструкции, отклонение от нормального расположения электродов. Зазоры в месте сварки, смещение кромок изменяют условия нагрева из-за шунтирования тока и степени сжатия электродов.

Механическое воздействие сварочного оборудования на свариваемые узлы проявляется при перекосах свариваемых деталей относительно сварочного оборудования в результате неправильной установки электродов, сдвига одного электрода относительно другого. Такие неточности во взаимном расположении электродов, а также свариваемых деталей не только увеличивают деформации, но и снижают качество соединений. Сдвиг электродов появляется вследствие неизбежного прогиба консоли под действием усилия сжатия. Такой прогиб для консольных сварочных машин неизбежен и он регламентирован (ГОСТ 297-80). Однако сдвиг одного электрода относительно другого вызван не самим прогибом верхней и нижней консолей, а разницей их прогибов, что и создает деформирующий сдвиг. Также взаимное смещение электродов и деталей в горизонтальной плоскости в процессе сварки происходит вследствие сдвига столбика нагретого металла между деталями, ограниченного пластическим пояском и образующего в результате теплового расширения.

Давление между электродами во время прохождения тока оказывает значительное влияние на процесс нагрева металла, т.к. от величины этого давления в значительной мере зависит сопротивление контактов как между электродами и деталями, так и между поверхностями свариваемых деталей, а, следовательно, зависит и количество выделяемого в этих контактах тепла.

При сварке металлов с относительно большим удельным сопротивлением количество выделяющегося тепла с изменением давления компенсируется увеличением тепла, выделяющегося в материале, вследствие увеличения силы тока. При сварке материала с малым удельным сопротивлением количество выделяющегося тепла с увеличением давления будет сильно падать, т.к. значительное уменьшение сопротивления контактов не компенсируется увеличением количества выделяющегося тепла вследствие увеличения силы тока.

Изменение размеров рабочей поверхности электродов (рис. 1.7) происходит вследствие естественного износа электродов.

Состояние контактной поверхности электродов оказывает заметное влияние на процесс сварки, т.к. от состояния этой поверхности в большой мере зависит сопротивление контакта между электродом и свариваемой деталью. При загрязненной контактной поверхности электродов сопротивление контакта между электродом и деталью возрастает, и хотя выделение тепла на этом контакте увеличивается, это тепло в значительной части является потерянным теплом, т.к. большая часть его отводится электродом. Та же часть, которая передается металлу слабо влияет на нагрев контакта между свариваемыми деталями. При прохождении электрического тока в контакте электрод-деталь развиваются высокие температуры, электроды нагреваются и разупрочняются. Это вызывает износ и увеличение исходного диаметра их контактной поверхности, может привести к недопустимому снижению плотности тока и, в конечном счете, к непровару.

Особенно большие требования к качеству и стойкости электродов предъявляются в крупносерийном и массовом производстве, например в автомобилестроении, где производительность доходит до 200 сварок в минуту и частые переточки электродов приводят к большим потерям времени на смену электродов или их зачистку. На контактной поверхности электрода температура устанавливается после сварки 25...30 точек. Увеличение темпа сварки вызывает повышение установившейся

температуры при нагреве и охлаждении. Максимальная температура нагрева контактной поверхности электрода при сварке малоуглеродистой стали толщиной 1+1 мм электродами из хромовой бронзы с темпом 200 сварок в минуту достигают 710 °С, с темпом 100 и 30 сварок в минуту – соответственно 525 и 450 °С, а при выключении тока температура снижается до 275, 125 и 30 °С в зависимости от темпа сварки. Перепад между температурами нагрева и охлаждения достигает 420...435 °С и практически не зависит от темпа сварки.

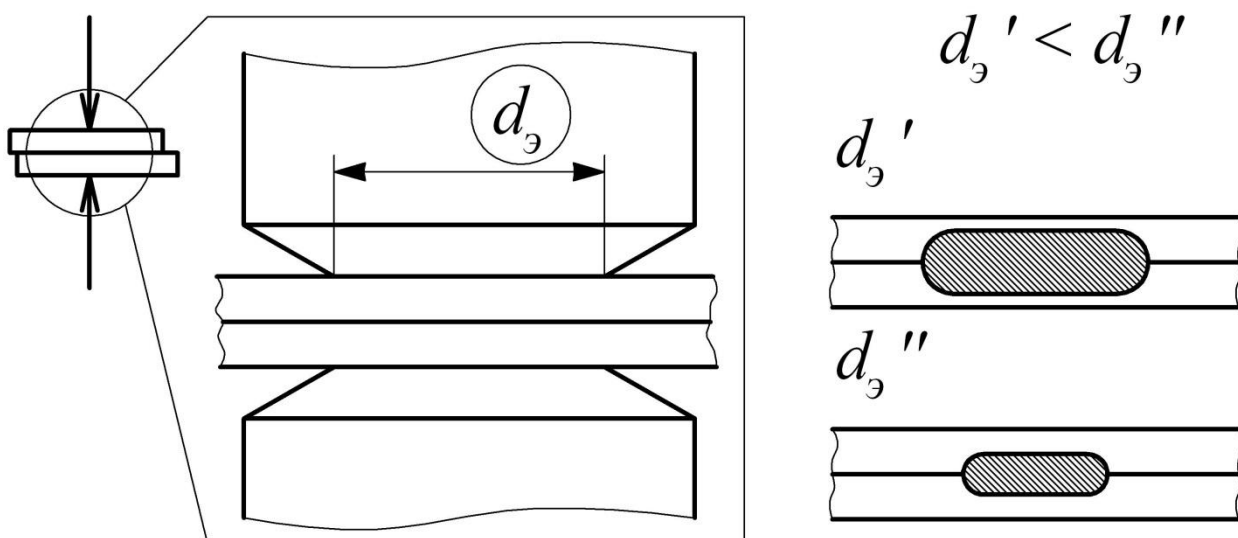


Рисунок 1.7 – Изменение размеров рабочей поверхности электродов как возмущение при контактной сварке

Наряду с напряжениями на торце электрода от усилий сжатия свариваемых деталей, возникают дополнительные термические напряжения, вызванные циклическими нагревами и охлаждениями контактной поверхности электродов при сварке. Под действием этих напряжений, да еще при высоких температурах, развивающихся в электродах, возникает пластическая деформация. По торцу электрода деформация распределяется крайне неравномерно. Максимальная деформация, достигающая 40-60 %, наблюдается в центре контактной поверхности электрода. Эта неравномерность пластической деформации контактной поверхности электродов, обусловленная условиями их работы в процессе сварки, приводит к неравномерности разупрочнения электродов.

Характер деформации контактной поверхности в основном не зависит от материала электродов и темпа сварки. Повышение темпа сварки вызывает лишь увеличение деформации.

Температурные условия работы электродов и их стойкость в большей мере определяются темпом сварки. Исследование стойкости электродов из хромовой бронзы показывает, что наиболее существенное увеличение диаметра контактной поверхности электродов происходит при сварке с темпом 200 точек в минуту, тогда при сварке с темпом 30 точек в минуту электроды, изготовленные из той же партии прутков хромовой бронзы, разупрочняются значительно меньше. Это подтверждается и замерами микротвердости, проведенными на контактной поверхности электродов после сварки 10000 точек. Анализ полученных данных показал, что разупрочняется в основном средняя часть этой поверхности, в то время как по краям ее твердость снижается меньше. Это соответствует и характеру деформации металла на торце электрода. После сварки 10000 точек электродами из хромовой бронзы твердость их в средней части контактной поверхности составляла 55...60 % от исходной твердости металла, а по периферии торца – 80...85 %.

Исследования структуры металла электродов показали, что в результате сварки наблюдаются изменения структуры, связанные с размельчением и рекристаллизацией исходного зерна, появлением на отдельных участках контактной поверхности электродов из хромовой бронзы после сварки 2000 точек, с темпов 30 сварок в минуту, следов скольжения, а после сварки большего количества точек (4000) – образование и развитие внутризеренных и межзеренных трещин.

Изменение сопротивления свариваемых деталей вследствие отклонений в условиях обработки их поверхностей может происходить от образца к образцу и от одной партии изделий к другой. Особенно это заметно на материалах, покрытых оксидными пленками. Сопротивление свариваемых деталей может изменяться также вследствие изменения толщины листов или

диаметра круглых заготовок, например прутков или проволоки. Разброс значений сопротивления деталей приводит к изменению тепловыделения в зоне сварки и, как следствие, к значительному разбросу прочностных характеристик сварных швов.

Шунтирование сварочного тока (рис. 1.8) наблюдается прежде всего при последовательной постановке точек. В этих условиях величина тока, протекающего через свариваемую точку, может изменяться вследствие ответвления некоторой части тока через ранее сваренные точки. Кроме того, ответвление тока может происходить через контакты, образуемые, например, неровностями поверхности свариваемых листов.

Суммарное значение тока во вторичном контуре изменяется вследствие шунтирования незначительно, однако сварочный ток, протекающий непосредственно через свариваемую точку, может снижаться до недопустимого уровня. С увеличением толщины деталей и уменьшением отношения шага точек к их диаметру степень шунтирования возрастает.

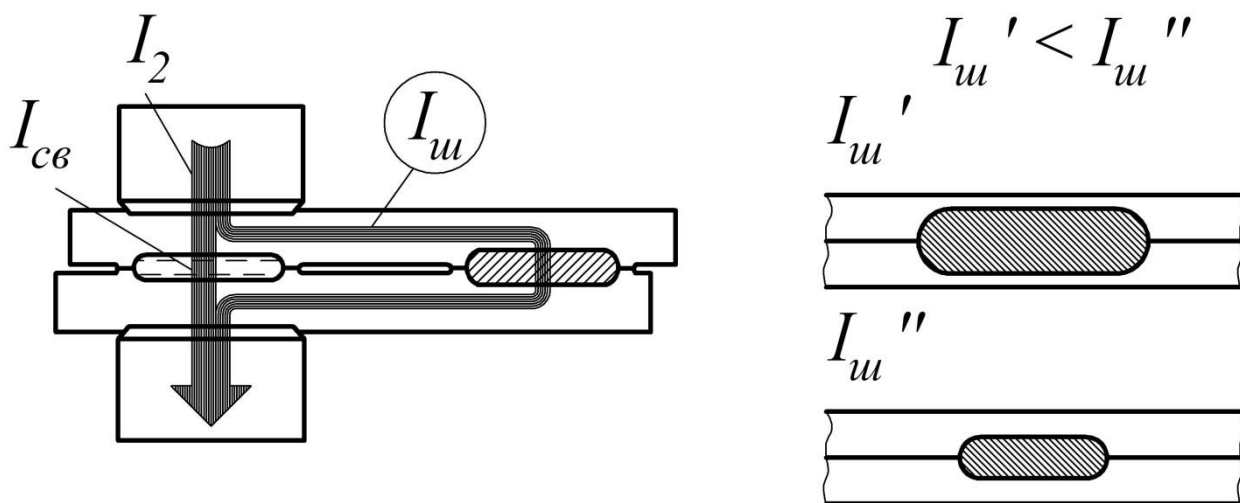


Рисунок 1.8 – Шунтирование сварочного тока
как возмущение при контактной сварке

1.2 Типовые детали и особенности технологии сварки

В диссертации рассматривается сварка нескольких типовых деталей – стойка заднего крыла автомобиля ВАЗ 2191 (рис. 1.9), балка крыши задней в сборе ВАЗ 2191 (рис. 1.10), усилитель поперечины панели задка ВАЗ 2123 (рис. 1.11)

Назначение стойки заднего крыла (рис. 1.9) – создавать силовой каркас автомобиля, обеспечение крепления обивки багажника. Также рассматриваемая деталь обеспечивает жесткость конструкции кузова автомобиля в случае аварии – удара сзади, при этом обеспечивается защита от проникновения в салон посторонних предметов. Приварка изделия к кузову автомобиля выполняется к заднему крылу, желобку заднего крыла и панели задка. В поперечном сечении рассматриваемая деталь имеет коробчатую форму и включает в себя: 1) стойку заднего крыла наружную (деталь кузова № 2191-8404386); 2) стойку заднего крыла внутреннюю (деталь кузова № 2191-8404386).

Таким образом, сварной узел включает в себя две детали, соединение которых происходит путём простановки 18 сварных точек согласно по ГОСТ 15878-79. Длина изделия составляет порядка 300 мм. Эксплуатация изделия осуществляется в условиях перепада температур в диапазоне от +40° до - 40°. В процессе эксплуатации изделие подвергается действию статических и динамических нагрузок. Эти нагрузки возникают во время движения автомобиля и при его ускорении. Различное состояние дорожного полотна может вызывать возникновение вибрационных нагрузок. Изделие в процессе эксплуатации автомобиля не подвергается воздействию агрессивных и коррозионных сред. Рассматриваемый сварной узел деталь не является лицевым.

Назначение балки крыши задней в сборе ВАЗ 2191 (рис. 1.10) – создавать силовой каркас автомобиля, обеспечение крепления обивки крыши. Также рассматриваемая деталь обеспечивает жесткость панели крыши

автомобиля в случае его опрокидывания и попадания на его крышу значительных масс снега. Приварка изделия к кузову автомобиля выполняется по левой и правой боковинам кузова. В поперечном сечении рассматриваемая деталь имеет коробчатую форму и включает в себя: 1) балку крыши заднюю верхнюю (деталь кузова № 2191-57011128); 2) балку крыши заднюю нижнюю (деталь кузова № 2191-57011122).

Таким образом, сварной узел включает в себя две детали, соединение которых происходит путём простановки 31 сварной точки согласно по ГОСТ 15878-79. Длина изделия составляет порядка 1000 мм. Эксплуатация изделия осуществляется в условиях перепада температур в диапазоне от +40° до - 40°. В процессе эксплуатации изделие подвергается действию статических и динамических нагрузок. Эти нагрузки возникают во время движения автомобиля и при его ускорении. Различное состояние дорожного полотна может вызывать возникновение вибрационных нагрузок. Рассматриваемый узел выполняет функцию пассивной безопасности – в момент опрокидывания автомобиля происходит защита салона от деформации. Изделие в процессе эксплуатации автомобиля не подвергается воздействию агрессивных и коррозионных сред. Рассматриваемый сварной узел деталь не является лицевым.

Усилитель поперечины панели задка в сборе (рис. 1.11) автомобиля 2123 предназначен для усиления поперечины панели задка при ударе сзади. Соединение изделия с кузовом автомобиля производится посредством контактной сварки к поперечине панели задка. Поперечное сечение рассматриваемого узла коробчатой формы. Сварной узел включает в себя следующие детали: усилитель поперечины панели задка (деталь номер 2123-5601452), надставка усилителя поперечины панели задка (деталь номер 2123-5601454) и заглушка усилителя в количестве двух штук (деталь номер 2123-5601456 и номер 2123-5601457). Длина сварного узла составляет 370 мм.

Эксплуатация изделия осуществляется в условиях перепада температур в диапазоне от +40° до - 40°. В процессе эксплуатации изделие подвергается

действию статических и динамических нагрузок. Эти нагрузки возникают во время движения автомобиля и при его ускорении. Различное состояние дорожного полотна может вызывать возникновение вибрационных нагрузок. Рассматриваемый узел выполняет функцию пассивной безопасности – в момент аварии автомобиля (при ударе сзади) происходит защита салона от деформации. Изделие в процессе эксплуатации автомобиля не подвергается воздействию агрессивных и коррозионных сред. Рассматриваемый сварной узел деталь не является лицевым.

Сварной узел - усилитель поперечины панели задка включает в себя четыре части и предусматривает выполнение соединений контактной точечной сваркой (рис. 1.11):

- сварка усилителя поперечины панели задка (деталь номер 2123-5601452) с надставкой усилителя поперечины (деталь номер 2123-5601454) осуществляется простановкой десяти сварных точек;
- сварка заглушки усилителя правой и левой (детали номер 2123-5601456 и 2123-5601457) осуществляется путём простановки 36 сварных точек (при этом на каждую заглушку приходится по 18 сварных точек); приварка каждой заглушки к усилитель поперечины производится выполнением 8 сварных точек, приварка каждой заглушки к надставке усилителя поперечины производится выполнением 10 сварных точек.

Выполнение заготовок для изготовления рассматриваемого сварного узла происходит на прессовом производстве путём штампования. Для этого применяют листовую сталь марки 08ЮП. Сталь 08ЮП является низкоуглеродистой качественной сталью, широко применяется при изготовлении деталей кузова в автомобилестроении. Химический состав (табл. 1.1) стали 08ЮП позволяет сочетать низкую стоимость стали и относительно высокие показатели механических свойств (табл. 1.2). Микроструктура проката должна быть ферритно-цементитной, зерно феррита должно быть вытянутым, допускается равноосное.

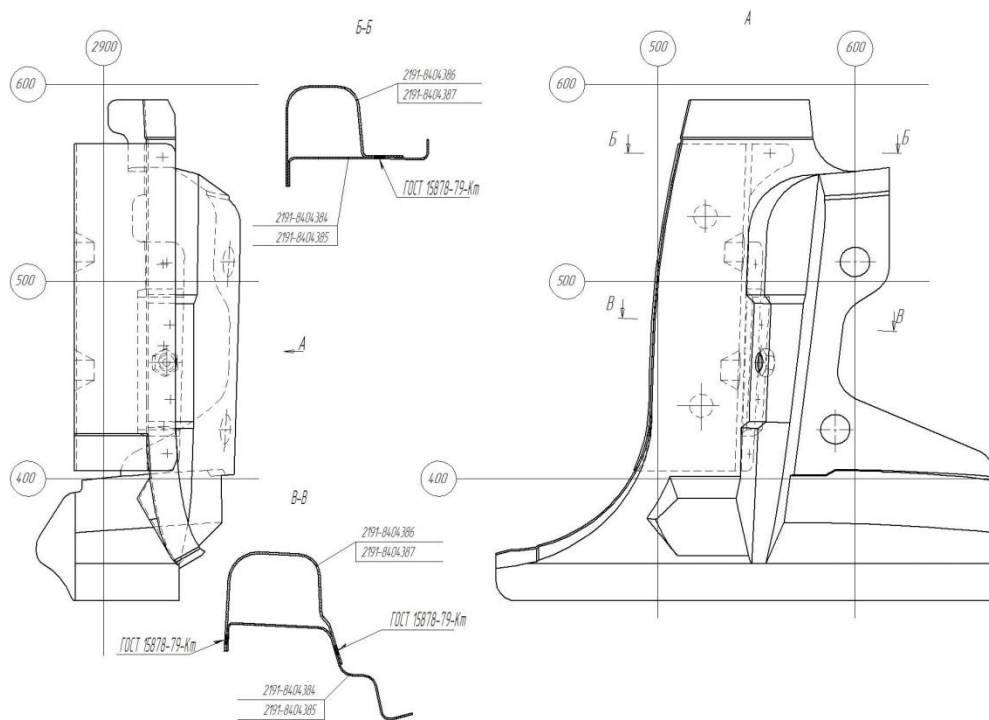


Рисунок 1.9 – Стойка заднего крыла в сборе ВАЗ 2191

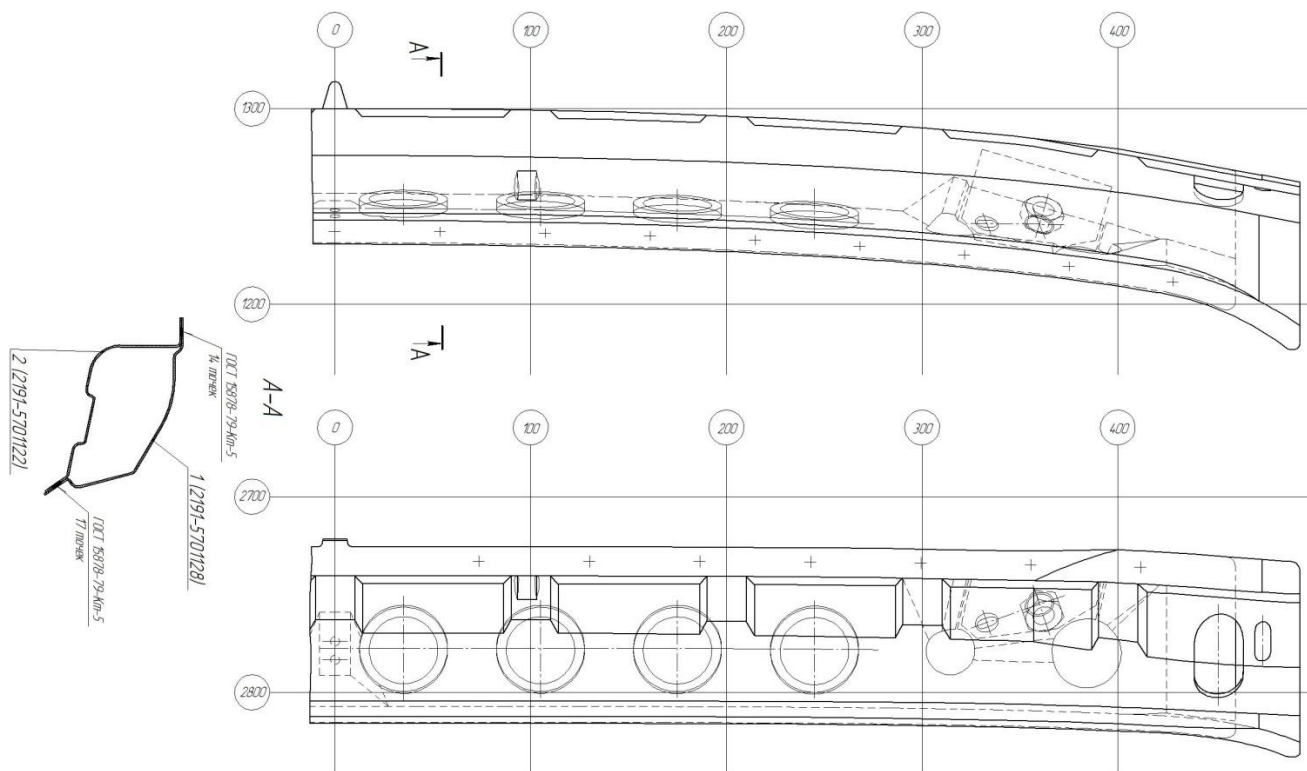


Рисунок 1.10 – Балка крыши задняя в сборе ВАЗ 2191

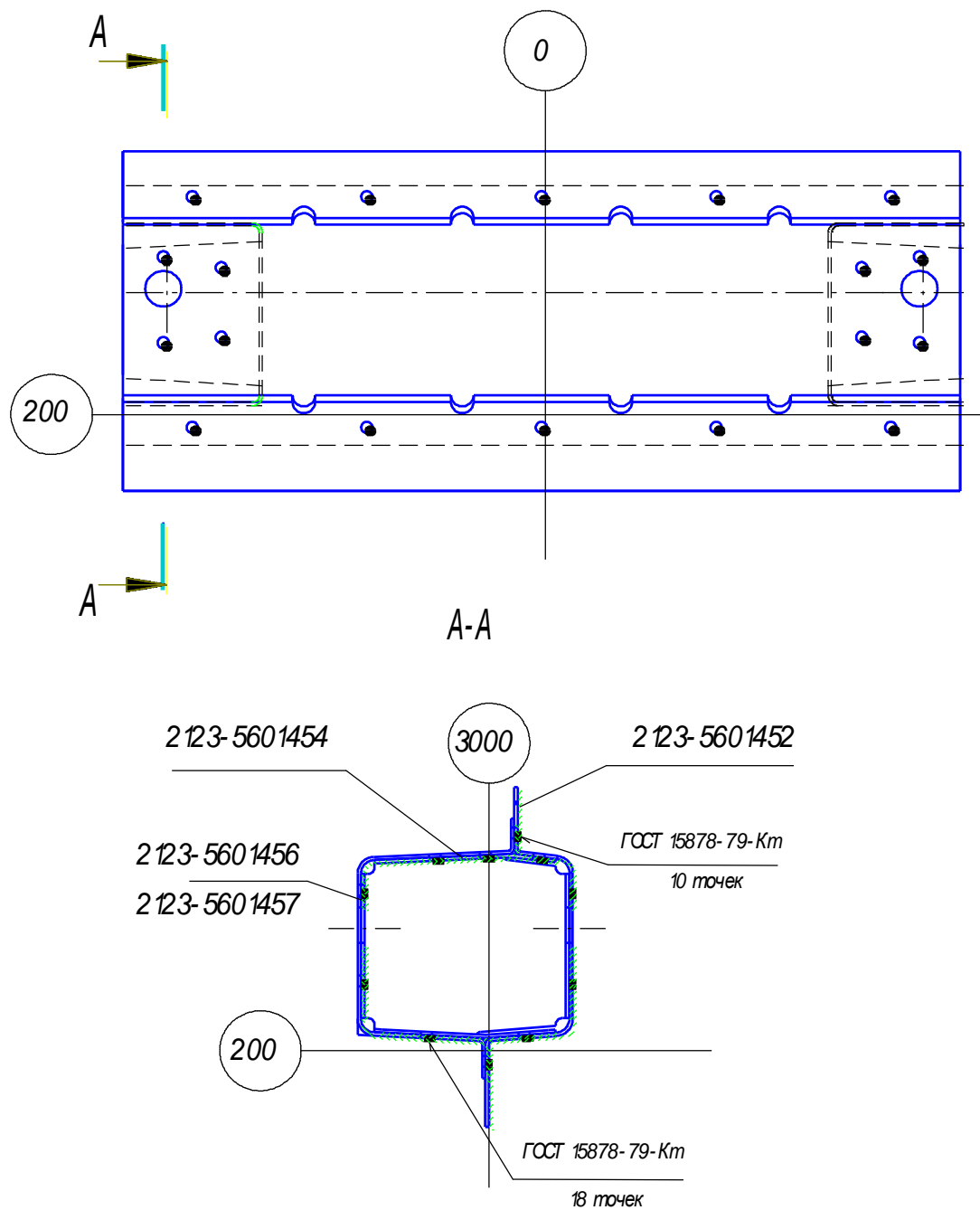


Рисунок 1.11 – Усилитель поперечины панели задка 2123-5601450

Таблица 1.1 – Химический состав стали 08ЮП (Fe - основа)

C	S	P	Mn	Cr	Si	Ni	Cu	N	Al
0,05... 0,09	≤0,015	0,06... 0,09	0,2... 0,35	≤0,06	≤0,05	≤0,06	0,01... 0,08	0,003... 0,007	0,03... 0,07

Таблица 1.2 – Механические характеристики стали 08ЮП

Наименование показателя	Предел текучести	Предел кратковременной прочности	Относительное удлинение после разрыва
Обозначение показателя	σ_T	σ_B	δ_{10}
Величина показателя	220...280 МПа	340...410 МПа	>31

Сварная точка должна получаться по ГОСТ 15878-79. ГОСТ 15878-79 регламентирует две группы точечных соединений: группа А и группа Б (табл. 1.3). Соединения группы А имеют литую зону большего диаметра, обладают более высокой прочностью, но требуют большей нахлестки. Группа соединения должна устанавливаться при проектировании в зависимости от требований к сварной конструкции и особенностей процесса сварки. Сварные точки для нашей детали принадлежат группе А.

По окончании сварки сварщик визуально контролирует сваренный узел. В первую очередь производится контроль сварных точек. Точки должны иметь темное ядро, вмятину, и цвета побежалости вокруг ядра. Недопустимы непровары (в этом случае отсутствует темное ядро и не наблюдается вмятина), прожоги. Сваренные изделия укладываются в оборотную тару, которую по мере наполнения изымают с участка и перевозят на участок сборки-сварки кузова.

Одно изделие из ста контролирует работник бюро технического контроля цеха. Контролируемое изделие проверяется в специальном кондукторе на соответствие геометрии, после чего, производится контроль на разрушение сварных точек. Выдержавшее контроль изделие, после соответствующей рихтовки запускается в дальнейший производственный цикл. Изделие не прошедшее контроль бракуется, партия сваренная после предыдущего контроля проходит дополнительный контроль, и в случае несоответствия требованиям на изделие забраковывается, брак изолируется.

Приспособление, используемое в базовой технологии, представляет собой оснастку, состоящую из плиты, на которой установлены базовые опоры и прижимы, приводимые в действие пневмоцилиндрами.

Таблица 1.3 – Геометрические параметры точечно-сварного соединения по ГОСТ 15878-79

Толщина деталей, мм	Параметры соединений, мм									
	Группа А					Группа Б				
	d, не менее	В, не менее		t, не менее	с, не менее	d, не менее	В, не менее		t, не менее	с, не менее
чёрные металлы и сплавы		цветные металлы и сплавы	чёрные металлы и сплавы				цветные металлы и сплавы			
0,3...0,4	2,7	7	10	8	9	1,7	5	7	7	8,5
0,4...0,5 0,5...0,6	3	8		10	12	2 2,2	6 7	8 9	8	10
0,6...0,7 0,7...0,8	3,3 3,5	9 10	12	11 13	13 15,5	2,5	8	10	10	12
0,8...1,0 1,0...1,3 1,3...1,6 1,6...1,8 1,8...2,2 2,2...2,7 2,7...3,2	4 5 6 6,5 7 8 9	11 13 14 15 17 19 21	14 16 18 19 20 22 26	15 17 20 22 25 30 35	18 20,5 24 26 30 36 42	3 3,5 4 4,5 5 6 7	9 10 11 12 13 15 17	12 13 14 15 16 18 20	12 14 16 18 20 23 26	15 16 18 19,5 24 27 31
3,2...3,7 3,7...4,2 4,2...4,7 4,7...5,2 5,2...5,7 5,7...6,0	10,5 12 13 14 15 16	24 28 31 34 38 42	28 32 36 40 46 50	40 45 50 55 60 65	48 54 60 66 72 78	- - - - - -	- - - - - -	- - - - - -	- - - - - -	

Анализ эффективности применения контактной сварки и средств автоматизации при производстве рассматриваемого сварного узла может быть проведён проверкой соответствия требованиям [52]:

Требование 1. Выполнение изделия из материалов, которые хорошо свариваются с применением контактной сварки. Это условие выполняется, так как детали узла изготовлены из низкоуглеродистой стали.

Требование 2. Сложный узел должен быть рационально разделён на подузлы, которые имели бы оптимальные габариты и расположение сварных соединений. Это условие выполняется – рассматриваемый сварной узел состоит из двух простых деталей, адекватное расположение сварных точек в легкодоступных местах.

Требование 3. Минимальное количество число ранее приваренных деталей, которые могут затруднить доступ сварочных электродов к месту сварки. Это условие выполняется – на рассматриваемом сварном узле отсутствуют приваренные узлы. Некоторую сложность могут представлять приваренные при помощи контактной рельефной сварки рельефные гайки, но их количество незначительное и они могут быть учтены при проектировании сварочной оснастки.

Требование 4. Базы фиксации свариваемого изделия (на кондукторе или столе машины) должны совпадать с базами фиксации, как при изготовлении деталей, так и при сборке сваренной сборочной единицы в готовом механизме (в машине и пр.) – это требование учтено при проектировании сборочного приспособления.

Требование 5. Минимальное число сварных соединений на лицевой поверхности сварного узла. Это требование соблюдено – сварные точки на лицевой стороне отсутствуют, так как рассматриваемый сварной узел не является лицевым.

Требования 6. Сварной узел должен иметь такую конструкцию, чтобы обеспечить расположение сварочных электродов под углом к плоскости контактируемых деталей не менее 85° . Это условие соблюдено - угол подвода электродов к поверхности свариваемых деталей составляет 90° .

Требование 7. В сварном узле необходимо обеспечить расстояние между соседними точками не менее 40 мм, так как в противном случае необходимо предусмотреть меры по борьбе с шунтированием сварочного тока. Это условие выполняется – при составлении проектной технологии предусмотрим повышение сварочного тока для устранения влияния эффекта шунтирования на качество сварных соединений.

Требование 8. В сварном узле следует предусмотреть величину нахлестки деталей в строго определенных пределах (чрезмерное уменьшение нахлестки приводит к повышению вероятности выплесков, а

неоправданное увеличение нахлёстки повлечёт за собой перерасход материалов и увеличение массы кузова автомобиля). Применительно к рассматриваемому сварному узлу это условие выполнено – величина нахлёстки составляет порядка 20 мм.

1.3 Обзор систем управления и контроля контактной точечной сваркой

В качестве примера систем контроля процесса контактной точечной сварки можно отметить широкую номенклатуру приборов Miyachi Uniteck [53], мониторы WeldComputer Corp., ATek Resistance Welding и Dengensha America (все США), карманный тестер TECNA (Италия) [54], измерительные системы ВНИИЭСО (Россия) [55].

В ИЭС им. Е. О. Патона также разработана серия приборов контроля и диагностики процесса (УДК-01, -02, -05) [56] и систем управления режимом сварки, которые имеют широкий набор функций по контролю параметров режима и качества сварного соединения (РВК-100, КСУ КС-02) [57, 58].

Описанные выше приборы по контролируемым параметрам отличаются несущественно.

Обычно это ток сварки или ток в первичной обмотке сварочного трансформатора, напряжение между электродами, давление или усилие сжатия электродов, перемещение электродов и время отработки операций в циклограмме. Однако по технической реализации они могут сильно отличаться. Так, серия Miyachi Uniteck включает стационарные MG3 (рис. 1.12, а), ММ-370 массой 5 кг с графическим дисплеем (рис. 1.12, б), более компактный ММ-122А (рис. 1.12, в) с массой 1,9 кг и возможностью подключения к внешнему персональному компьютеру (например, ноутбуку) и печатающему устройству, так называемый «наладонный» ММ-380 с массой 0,9 кг (рис. 1.12, г) и, наконец, карманные приборы для измерения параметров тока ММ-315А и усилия сжатия ММ-601А. В тоже время

мониторы WeldComputer Corp. похожи на промышленные рабочие станции с полноценным графическим экраном с возможностью работать как локальное, удаленное или сетевое устройство, контролирующее несколько сварочных машин.



Рисунок 1.12 – Измерительная аппаратура для контактной сварки производства Miyachi Unitek

В ИЭС им. Е. О. Патона создана экспертная система для контактной точечной сварки [59], которая на основе баз данных и знаний выдает рекомендации по технологии сварки изделий с заданной толщиной деталей, состоянием их поверхности, особенностей конструкции и марки материала. Для повышения конкурентоспособности желательна разработка приборов контроля с функциями экспертной системы. Кроме работы справочной системы, существует также возможность выбора наиболее эффективного

способа оценки качества для рассматриваемого изделия и автоматического переключения прибора в требуемый режим контроля.

Приборы УДК были построены на основе промышленных контроллеров. Реализация в них алгоритмов, аналогичных экспертным системам, из-за ограниченного объема памяти для хранения программы и данных невозможна. Дисплеи для вывода данных имеют ограниченные возможности по объему выдаваемой текстовой и графической информации. Вместе с тем полноценный вывод информации является очень важным и его отсутствие приводит к ограничению возможностей экспертных систем. В то же время приборы контроля и управления являются сложными компьютерными устройствами и выпуск их малыми партиями приводит к большой себестоимости.

В настоящее время широкое применение в быту (развлечения, организация рабочего дня, перевод текста, GPS, контроль здоровья и т. п.) находят мобильные компьютерные вычислительные средства с экранами от 3...4 дюймов для отображения текстовой и графической информации — карманные персональные компьютеры (КПК), смартфоны, коммуникаторы, нетбуки и ноутбуки. Их технические характеристики при обеспечении возможности съема информации о параметрах процесса сварки со сварочной машины с успехом могут заменить перечисленные выше приборы и, кроме того, получить дополнительные преимущества путем реализации требуемых функций экспертной системы.

1.4 Формулировка задач диссертационного исследования

В диссертационном исследовании поставлена цель — повышение производительности и качества контактной точечной сварки в условиях действия возмущений.

При анализе современного состояния вопроса обеспечения качества контактной сварки выявлено три составляющих, которые определяют качество контактной сварки:

- возмущения технологического процесса при контактной точечной сварке;
- контроль качества соединений, выполненных контактной точечной сваркой;
- управление контактной точечной сваркой в условиях возмущений.

Выполнен анализ возмущений при контактной сварке, рассмотрены:

- колебания напряжения питающей сети;
- изменение сопротивления вторичного контура сварочной машины;
- изменение условий сжатия деталей сварочными электродами;
- изменение размеров рабочей поверхности электродов;
- изменение сопротивления свариваемых деталей;
- шунтирование сварочного тока.

Самым опасным следует признать возмущение – изменение размеров рабочей поверхности электродов.

Также на основании проведённого анализа работ в области управления и диагностики контактной сварки следует признать актуальным вопрос контроля качества контактной сварки. Сформулируем задачи диссертационного исследования, последовательное решение которых позволит достигнуть поставленной цели:

- 1) выполнить анализ систем и методик контроля качества контактной сварки и предложить на его основе меры по повышению эффективности диагностики контактной точечной сварки в условиях возмущений;
- 2) выполнить анализ возмущения контактной сварки – износ сварочных электродов на предмет его влияния на качество сварки, возможности своевременной диагностики и компенсации;
- 3) выполнить анализ систем управления контактной точечной сваркой и предложить на его основе меры по повышению эффективности управления контактной точечной сваркой в условиях возмущений.

2 Контроль качества контактной сварки в условиях возмущений

2.1 Общая постановка вопроса

Широкое применение контактной точечной сварки в различных областях промышленности, обусловлено высокой степенью ее механизации, роботизации, автоматизации и, как следствие, высокой производительностью. В сварном точечном соединении возможно возникновение различных дефектов, причинами которых являются несовершенство оборудования для контактной сварки, сборочные, подготовительные операции и др. Необходимым условием формирования качественного сварного соединения, выполненного с применением контактной сварки, является образование общей для соединяемых заготовок расплавления. Эта зона расплавления должна иметь заданные размеры, что в свою очередь позволяет обеспечить важнейшее эксплуатационное свойство – прочность точечного сварного соединения [1]. Размер этой зоны при точечной сварке определяется диаметром литого ядра и регламентируется ГОСТ 15878–79 «Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры».

Основными дефектами КТС можно назвать непровар, выплеск, трещины, раковины и отклонение геометрических параметров сварного соединения [2]. Непровар является одним из самых опасных дефектов и может проявляться в виде полного отсутствия или уменьшения литого ядра, а также при частичном или полном сохранении оксидной пленки или лакирующего слоя в контакте деталь–деталь. Количество дефектов, которые могут быть допущены допускаемых без исправления, и количество дефектов, подлежащих исправлению, определяется ответственностью сварного узла и регламентировано соответствующими техническими условиями. Значительно снизить количество дефектов и вероятность их появления позволяет

контроль режимов работы оборудования (электрических и механических) и управление процессом КТС [3].

Контролируют качество точечной сварки чаще всего внешним осмотром деталей и разрушением опытных образцов. Преобладание разрушающих методов контроля обусловлено простотой и наглядностью результатов. Однако разрушающие методы имеют существенный недостаток (кроме, естественно, самого процесса разрушения) — позволяют проводить только выборочный контроль. Подобного недостатка лишены методы НК [4].

2.2 Капиллярные методы контроля

Данные методы в свой основе имеют свойства индикаторных жидкостей (пенетрантов) капиллярно проникать в различные полости поверхностных и сквозных несплошностей контролируемых изделий. При этом образующиеся индикаторные следы регистрируют визуальным способом или с использованием специальных преобразователей.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на люминесцентный, цветной, люминесцентноцветной, яркостный [5].

К недостаткам метода можно отнести то, что он выявляет только поверхностные или сквозные несплошности; требует значительных временных затрат на подготовку поверхности изделий, а также на обработку результатов контроля; невозможность автоматизации. Значительная трудоемкость капиллярных методов препятствует их использованию для контроля КТС, так как в некоторых конструкциях количество сварных точек может достигать нескольких тысяч и более.

2.3 Оптические методы контроля

Наиболее дешевым и оперативным методом НК является внешний осмотр. Обычно при помощи внешнего осмотра осуществляют контроль всех

сварных изделий. При этом применение внешнего осмотра происходит независимо от использования других методик контроля. Внешний осмотр сварных соединений осуществляют невооруженным глазом или с использованием увеличительной лупы. При внешнем осмотре определяют наличие и правильность расположения сварных точек на детали, производят оценку формы и размеров вмятины от сварочных электродов, определяют присутствие в сварном соединении наружных дефектов, выявляют зазоры между деталями [6].

При внешнем осмотре визируют отпечатки сварных точек, которые должны быть круглой формы. Допускаемая величина глубины вмятины равна 10...15 % от толщины свариваемых деталей при сварке деталей одинаковой толщины. Если производится сварка деталей разной толщины, то глубина вмятины со стороны толстой детали может быть увеличена до 25 % [2]. Поверхность сварных точек должна быть свободна от выплесков металла.

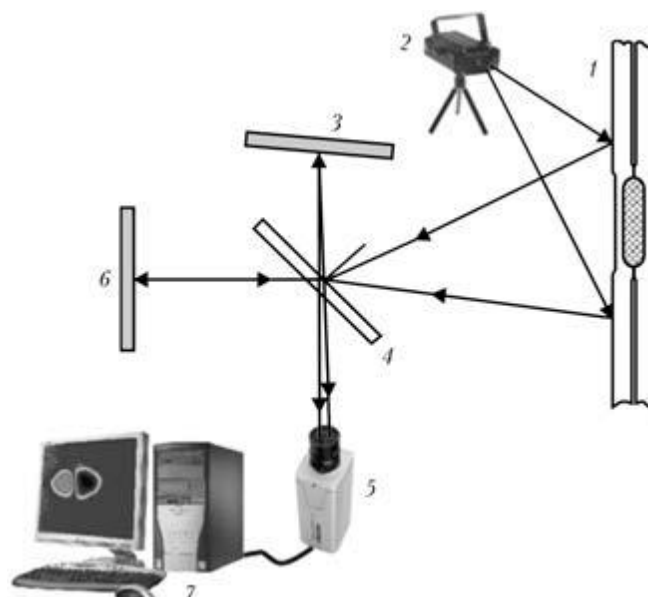
В случае применения оптико-электронных средств обработки изображений возрастает эффективность оптического контроля, появляется возможность его автоматизации. Например, лазерные сканирующие сенсоры и цифровые видеокамеры используются для измерения контура отпечатков сварочных электродов, определения наружных дефектов и трещин [7]. В новых разработках оптических сканеров применяется динамический порог и алгоритмы морфологии для сегментирования дефектов [8]. Геометрия отпечатка на поверхности деталей от сварочных электродов является показателем качества точечного сварного соединения. Так, если настрой контактной машины не изменялись, а размеры отпечатков изменились, следует ожидать нарушения процесса сварки, который в свою очередь мог привести к снижению стабильности качества.

Приборы оптической интерферометрии позволяют с большой точностью измерять перемещения и деформации элементов сварных конструкций как в процессе их изготовления, так и эксплуатации. Оценку

качества КТС также проводят по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния сварных соединений [9].

В последние годы для НК качества точечных соединений используется метод электронной ширографии (Digital Shearography), который является бесконтактным оптическим интерференционным методом контроля деталей и конструкций, изготовленных из различных материалов [10]. Суть метода электронной ширографии состоит в следующем. Объект контроля (ОК) частично или полностью освещается лазером, свет от которого при отражении от поверхности деталей попадает на элемент, который размещён перед объективом CCD-камеры (рис. 2.1). В плоскости изображения CCD-камеры появляются два смещенных изображения ОК. За счёт интерференции световых волн возникает хаотическая микроинтерференционная спекл-структура, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-структуры записываются для двух состояний объекта (до и после нагружения) и сравниваются между собой. Цифровая обработка изображений производится для получения макроинтерференционных полос (широграммы). Эта широграмма содержит информацию о производных от компонент вектора перемещений точек поверхности. В зоне сварного дефекта наблюдается концентрация напряжений и деформаций, которая под воздействием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос. На основе полученных данных можно судить о наличии дефектов в контролируемом объекте [11, 12]. Метод также позволяет определить размер ядра сварной точки. Результаты применения электронной ширографии для диагностики сварных точечных соединений приведены в работе [13].

К недостаткам электронной ширографии можно отнести необходимость нагружения ОК, что может потребовать дополнительных приспособлений и времени на проведение контроля КТС. К тому же по полученным картинам интерференционных полос трудно судить о параметрах дефекта.



1 – сварная конструкция; 2 – источник лазерного излучения; 3 – подвижное зеркало; 4 – светоделитель; 5 – CCD-камера; 6 – неподвижное зеркало; 7 – компьютер

Рисунок 2.1 – Схема контроля с применением электронной широкографии

2.4 Вихретоковые методы контроля

Эта методика контроля в своей основе содержит регистрацию изменения поля вихревых токов, наводка которых производится в приповерхностном слое изделия. Применительно к контактной точечной сварке вихретоковый метод используют для контроля размеров литого ядра. В случае отсутствия литого ядра наблюдается увеличение локальной электропроводности, что соответствует полному непровару. Если размеры литого ядра увеличиваются до номинального значения, наблюдается снижение локальной электропроводности до некоторой экспериментально установленной величины. Изменение электропроводности вызывает изменение электрических параметров преобразователя – активного и реактивного сопротивления катушки индуктивности, которое регистрируется дефектоскопом [2, 14]. Чувствительность электромагнитного метода контроля существенно зависит от зазора между датчиком и поверхностью контролируемого изделия (при этом особенно сильно проявляется влияние

глубины вмятины на поверхности деталей), а также их взаимного расположения, формы и размеров [15]. Так как в настоящее время не существует теоретических методов установления зависимости удельной электрической проводимости от дефектности сварного соединения, то задача решается экспериментальным путем [16], что можно отнести к недостаткам данного метода.

2.5 Магнитные методы контроля

Магнитные методы неразрушающего контроля применяют главным образом для контроля изделий из ферромагнитных материалов. В зависимости от способа получения информации магнитные методы контроля могут быть разделены на: 1) магнитопорошковый, 2) магнитографический, 3) феррозондовый, 4) индукционный, 5) на основе эффекта Холла, 6) пондеромоторный, 7) магниторезисторный [5]. С помощью магнитных методов контролируют размеры сварной точки, сплошность и механические свойства. При использовании магнитных методов в области сварного соединения создается сильное магнитное поле. Любой дефект, попадающий в это поле, будет создавать локальное поле утечки (рассеяния). По распределению магнитного поля вокруг места сварного соединения определяют качество контактной точечной сварки.

Например, в магнитопорошковом способе характер распределения магнитного поля определяется по расположению частиц, специально помещенных на поверхности изделия. Очевидным недостатком данного способа является его трудоемкость и невозможность автоматизации (в отличие от других способов магнитного НК).

К общим недостаткам традиционных магнитных методов можно отнести то, что распределение магнитного поля на поверхности контролируемых образцов зависит не только от наличия и величины дефектов, но и от локальной структурной или магнитной неоднородности металла. Это требует создания специализированных методов обработки

первичной информации, чтобы избежать ложной расшифровки полученных в процессе контроля данных.

В работе [17] предложен способ магнитного контроля точечных сварных соединений, при котором сварное соединение после сварки размагничивают, а затем намагничивают в слабых диапазонах полей 240 А/см. Над сварной точкой устанавливают феррозонд-градиентометр перпендикулярно плоскости соединения. С помощью устройства сканирования датчик перемещают над сварной точкой с постоянной скоростью. С шагом $h = 0,1$ мм проводят запись величины нормальной составляющей поля рассеяния, выделяют ее экстремальные значения, а о качестве сварного соединения судят по диаметру сварной точки, который определяется выражением $d = hn$ (где n — количество измерений между двумя экстремумами).

Для повышения пространственного разрешения и чувствительности магнитного метода используют специальные миниатюрные датчики в виде решеток на базе магниторезисторов (giant magnetoresistor, GMR) или датчиков SDT (spin dependent tunneling) [18, 19].

Заслуживает внимания возможность применения для контроля КТС метода магнитной памяти металла (МПМ) [20]. Это метод НК, который основан на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПП), который наблюдается на поверхности изделий [20]. Путем считывания СМПП, формирующегося в процессе сварки и отображающего остаточную намагниченность, можно выполнять интегральную оценку состояния сварного соединения. Качество соединения оценивают по характеру распределения нормальной составляющей магнитного поля и его градиента. Бесспорным преимуществом метода является то, что не используется процедура намагничивания изделия. Однако в некоторых случаях использование метода МПМ для КТС может потребовать предварительных экспериментальных исследований для разработки методики контроля и способов обработки информации, так как согласно

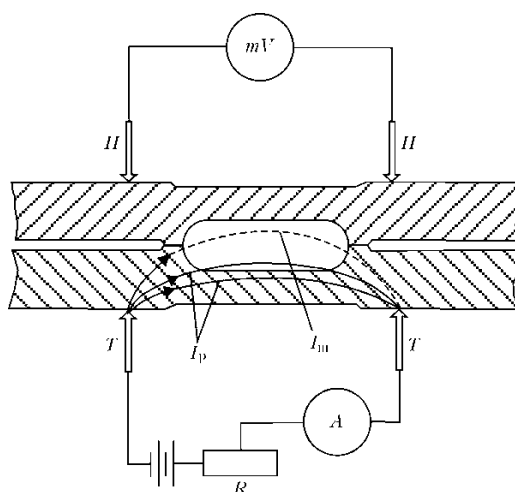
некоторым исследованиям результаты, полученные с использованием данного метода, не позволяют достоверно прогнозировать место разрушения образцов [22].

Для контроля КТС разработан метод, получивший название магнитно-тепловой [23]. Суть метода заключается в том, что участок конструкции, на котором предполагается выполнить сварку, предварительно намагничивают постоянным магнитным полем, имеющим определенную величину и направление. После этого производят сварку. Под действием нагрева от сварки происходит размагничивание металла. Характер распределения остаточной магнитной индукции после сварки отражает характер распространения теплового поля в пределах температур ниже точки Кюри. Учитывая, что непровар в основном связан с недостаточным разогревом соответствующей зоны металла, по величине остаточной магнитной индукции можно определить геометрические параметры зоны проплавления сварного соединения.

Интерес также представляет развитие магнитооптического метода контроля, который основан на визуализации магнитограмм [24]. В первую очередь метод используется для контроля поверхностных дефектов (трещин). Кроме этого, с помощью магнитооптического контроля можно визуализировать области концентрации остаточных напряжений в точке роста трещин. Важными преимуществами метода является нечувствительность к плоскостности, шероховатости и ориентации исследуемой поверхности, возможность программной обработки и документирования результатов контроля. В работе [25] предложен способ магнитооптического контроля, который заключается в том, что после намагничивания ОК к его поверхности прижимается гибкий магнитный носитель. На носитель копируется магнитное поле при перемещении его вдоль поверхности изделия. Записанное распределение намагниченности визуализируется в магнитооптической пленке из копии распределения, полученной на гибком магнитном носителе.

2.6 Электрические методы контроля

Согласно работе [26], к перспективным методам НК соединения, полученного контактной точечной сваркой, относится использование токов шунтирования (рис. 2.2). Способ состоит в пропускании через сварное соединение с одной стороны листа постоянного или высокочастотного тока 10...20 А в импульсном режиме (0,3...0,5 с) с замером тока шунтирования (величины падения напряжения со стороны второго листа в области сварки). По величине сигнала от датчика судят о характере сварки по сравнению с сигналом от эталонного образца.



$I_{ш}$ – ток шунтирования; I_r – рабочий ток; П – потенциальный щуп; Т – токовый щуп

Рисунок 2.2 – Схема контроля непровара с использованием токов шунтирования

2.7 Радиационные методы контроля

Радиационный контроль сварных соединений обычно проводят с помощью рентгеновского или гамма-излучения [27]. При помощи этой методики контроля возможно выявление выплесков, трещин, раковин, скоплений оксидов и пор. Как показала практика, простое рентгеновское просвечивание в большинстве случаев не даёт информации о наличии и размерах литой зоны сварной точки. Это объясняется тем, что у металла ядра

сварной точки и у основного металла значение коэффициентов ослабления рентгеновских лучей практически одинаковы. Вследствие этого рентгеновские снимки не позволяют выявить границу литого ядра. Наблюдающийся на рентгеновских снимках видимый круг иной контрастности объясняется наличием вмятины от сварочных электродов. Однако у некоторых металлов литая зона может быть неоднородна по химическому составу, что вызывает неодинаковое ослабление рентгеновских лучей, которые проходят через различные участки ядра сварной точки.

Химическая неоднородность металла зоны сварки может быть вызвана искусственно. Для этого следует предварительно ввести в нахлестку между деталями рентгеноконтрастный материал-свидетель (РКМС), который имеет высокий коэффициент ослабления рентгеновских лучей [28]. При расплавлении металла в ядре происходит перемещение РКМС на периферию сварной точки. При просвечивании на рентгенограмме становится видимым светлое кольцо, которое будет соответствовать диаметру ядра сварной точки. В случае, если литое ядро не образовалось, наблюдается равномерное распределение РКМС в нахлестке и отсутствие светлого кольца.

Очевидными недостатками рентгеновских методов являются их повышенная опасность для дефектоскописта, значительная стоимость и габариты оборудования, трудность расшифровки полученных снимков. Однако в последнее время налажен выпуск переносных малогабаритных рентгеновских дефектоскопов (например, серия ERESKO MF4), которые соответствуют европейским требованиям безопасности и могут применяться в условиях производства. При этом достигнут значительный прогресс в разработке методов расшифровки и классификации дефектов по радиографическим снимкам сварных соединений, что позволит автоматизировать процесс контроля. Так, в работе [29] приведено математическое описание изображений различных дефектов сварных соединений и разработан эвристический классификатор для определения типа дефекта. В работе [30] предложен алгоритм многомасштабного анализа

рентгенографических снимков металлоконструкций, направленный на обнаружение дефектов и оценку качества сварных соединений. Алгоритм основан на использовании вейвлет-преобразования с выбором масштабирующих коэффициентов адаптивно к изменению геометрических характеристик визуальных образов дефектов.

2.8 Акустические методы контроля

На сегодня акустические методы приобрели наибольшее распространение в дефектоскопии сварных соединений, в том числе и КТС. Эффективность метода доказана большим количеством исследований и разработок, проведенных на разных заводах [31...34].

При УЗ контроле, как правило, используется пьезоэлектрический преобразователь частотой 10...20 МГц с линией задержки для генерации серии эхо-сигналов, представляющих различные отражения звуковой волны внутри сварного соединения, которые далее интерпретируются для определения его качества [35]. При использовании обычных одноэлементных датчиков результат контроля отображается на экране дефектоскопа в виде А-скана, представляющего зависимость амплитуды принятых сигналов от времени (толщины). УЗ контроль позволяет определять раковины, трещины, поры и выплески, а также может эффективно использоваться для диагностики полного непровара. Для определения частичного непровара необходимо использовать специальные методики контроля и расшифровки УЗ дефектограмм. Недостатком большинства УЗ методов является невозможность отличить наличие литого ядра от слипания. В целом для УЗ контроля характерно то, что дефектоскопист должен принимать непосредственное участие в настройке контрольно-измерительных операций во время контроля, например, устанавливать стробы, задавать браковочные уровни и, вообще, наблюдать сам А-скан для обеспечения корректной работы системы. Поэтому перспективным направлением является развитие и

внедрение в практику УЗ контроля систем искусственного интеллекта, которые бы позволяли принимать решения по результатам контроля с минимальным вовлечением в этот процесс дефектоскописта. В последнее время для интерпретации УЗ осциллограмм и оценки качества КТС широко применяются искусственные нейронные сети, что позволяет уменьшить субъективную ошибку и повысить степень автоматизации контроля [36, 37].

Для контроля сварных точек в основном применяют эхо- и реверберационный методы [38].

Первый позволяет определять толщину литого ядра в направлении прозвучивания, второй — основан на анализе времени объемной реверберации (процесса постепенного затухания звука в некотором объеме ОК), что дает возможность определить микроструктуру материала и литого ядра.

Особое место среди методов УЗ дефектоскопии занимает акустико-эмиссионный (АЭ) метод, применяемый для контроля и управления процессом КТС [39]. При сварке в материале соединяемых деталей возникают упругие колебания (акустическая эмиссия), которые обусловлены резкими изменениями его структуры, фазовыми превращениями и развитием дефектов [40]. Сигналы АЭ можно принимать на протяжении всего сварочного цикла, а также в процессе остывания сварного соединения. Анализ параметров АЭ сигналов позволяет оценить размеры литой зоны свариваемых деталей и следить за возникновением внутренних дефектов, а также диагностировать слипание (по отсутствию регистрации сигналов АЭ) [41, 42]. Несмотря на это метод акустической эмиссии имеет ряд недостатков, которые затрудняют его применение при осуществлении контроля качества контактной сварки и управления процессом сварки. Главным недостатком является низкая помехоустойчивость способа, которая объясняется тем, что в процессе сварки регистрация сигналов АЭ происходит на фоне высокого уровня шумов от оборудования для контактной сварки.

2.9 Выбор методики неразрушающего контроля

Эффективность применения методов неразрушающего контроля зависит от большого количества факторов, главные из которых — выявляемые типы дефектов, производительность метода, оперативность, безопасность и стоимость [43]. В целом понятие «эффективность» достаточно трудно формализуемо при сравнении разных методов контроля и включает не только перечисленные выше факторы. Например, эффективность применения того или иного метода НК зависит от геометрических параметров и физико-механических свойств объекта контроля; степени развития способов обработки полезного сигнала (теоретической базы для используемого метода); уровня развития электроники и схемотехники (возможности использования высокоскоростных устройств приема/передачи и обработки данных); разработки новых методик и материалов для проведения контроля и т.п. Поэтому любое сравнение эффективности методов неразрушающего контроля является достаточно субъективным, узконаправленным и применимым в течение ограниченного промежутка времени (например, до очередного скачка в развитии вычислительной техники или создания нового поколения преобразователей для того или иного метода).

Например, в работе [44] приведены примерные оценки различных методов НК по выявляемости дефектов в изделиях из различных материалов различного назначения. Для сварных соединений оценки следующие: радиационный — 3, акустический — 5, вихретоковый — 3, магнитный — 3, капиллярный — 4, тепловой — 3, оптический — 0, радиоволновой — 0 (где 5 — «отлично», 4 — «хорошо», 3 — «удовлетворительно», 0 — «неудовлетворительно»).

Выбор метода неразрушающего контроля контактной точечной сварки может быть обусловлен: 1) особенностями геометрических параметров и физико-механических характеристик объекта контроля; 2) требованиями к

качеству изделий, что регламентируется соответствующей документацией; 3) характером и видом наиболее вероятных и/или опасных дефектов; 4) производительностью метода контроля; 5) экономическими показателями.

Однако оптимальным решением является использование комплексного подхода к контролю качества КТС. Данный подход заключается в использовании ряда методов, в результате которых получают полную информацию о наличии дефектов, их виде, размерах, глубине залегания [45].

Естественно, что недостатком такого подхода являются значительные затраты времени на проведение всех контрольно-измерительных операций.

Все же с развитием электроники (особенно высокоскоростных компонентов обработки, приема/передачи данных) этот недостаток вполне преодолим. Еще один фактор, позволяющий снизить время контроля, — автоматизация процесса измерения и анализа данных, при котором оператор лишь контролирует этот процесс (его вмешательство может быть обусловлено только возникновением нестандартной ситуации). В этом отношении ключевую роль в ближайшем будущем будут играть нейронные сети и разработка алгоритмов классификации дефектов.

3 Анализ износа сварочных электродов как возмущающего фактора при контактной точечной сварке

3.1 Общая постановка вопроса

В процессе контактной сварки происходит нагрев сварочных электродов до высоких температур. Этот нагрев происходит за счет выделяющейся при сварке теплоты и за счёт нагрева электродов от проходящего через них сварочного тока в контакте «электрод-деталь» рабочая поверхность сварочного электрода может разогреваться до 750°C при сварке стальных деталей. При этом величина удельного давления может достигать 400 МПа (рис. 3.1).

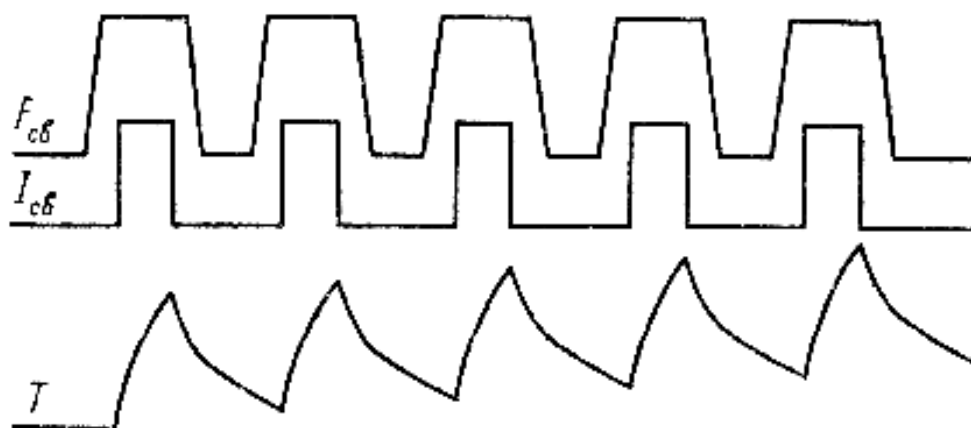


Рисунок 3.1 – Изменение силы $I_{св}$ сварочного тока, усилия $F_{св}$ на электродах и температуры T рабочей поверхности сварочных электродов в процессе контактной точечной сварки

В результате действия усилия и высокой температуры металл рабочей части электродов претерпевает неравномерную пластическую деформацию, что приводит к неравномерному разупрочнению поверхности сварочных электродов.

В результате естественного износа изменяются размеры рабочей поверхности электродов. Величина износа сварочных электродов определяется многими факторами: режимом сварки; свариваемым

материалом; чистотой поверхности свариваемых деталей; интенсивностью охлаждения; стойкостью материала электродов и т.п. В ходе износа сварочных электродов происходит увеличение площади их контактной поверхности, уменьшение плотности тока и размеров ядра сварной точки, что может приводит к появлению непроваров.

В процессе контактной сварки рабочая поверхность сварочного электрода подвергается циклическому нагреву до температур 400...700 °С. Также происходит ударное смятие, загрязнение из-за явления массопереноса в контакте «электрод-деталь».

Циклический нагрев и ударное смятие приводит к постепенному увеличению диаметра рабочей части d_3 электрода. Это в свою очередь вызывает уменьшение плотности тока и электрического сопротивления участка «деталь – деталь». Также изменяется тепловой баланс при сварке – растёт доля тепла, уходящего в сварочные электроды. Всё это приводит к уменьшению диаметра ядра сварной точки и глубины проплавления. Характерная кривая состояния сварочных электродов (рис. 3.2) практически одинакова для различных материалов, имеются лишь отличия в угле наклона кривой.

Первый этап – этап приработки сварочных электродов (простоянка первых 10...100 точек). Он характеризуется высокой скоростью деформации рабочей части, что объясняется развитием микропластического смятия и увеличенной деформационной способностью исходной поверхности сварочного электрода.

Второй этап – этап стабильного износа. Этот этап характеризуется уменьшением скорости смятия, развитием медленного установившегося износа, объясняемого высокотемпературной циклической ползучестью.

Третий этап считается катастрофическим. Он наступает после сварки определённого числа точек при достижении диаметром рабочей поверхности электродов некоторого критического значения $d_{э.кр}$.

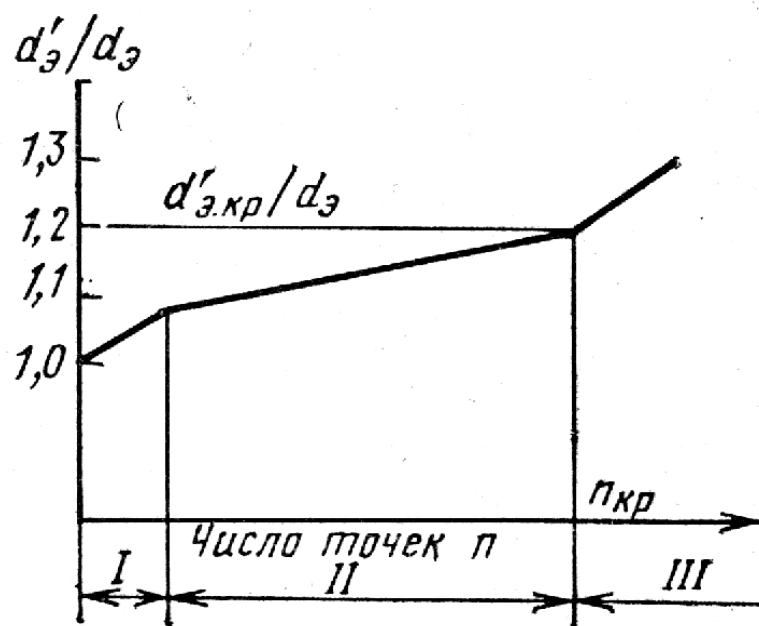


Рисунок 3.2 – Кинетика изменения диаметра рабочей части электрода в процессе сварки выполнения большого числа точек: I – приработка; II – установившийся износ; III – катастрофический износ

Как показывает практика, контактная сварка со стабилизацией сварочного тока приводит к постепенному уменьшению диаметра ядра вследствие износа сварочных электродов. Постепенное увеличение диаметра ядра сварной точки по мере износа может быть компенсировано ступенчатым увеличением значения сварочного тока. При этом неправильный выбор параметров такого ступенчатого увеличения тока может привести к непровару.

Диаметр ядра сварной точки коррелирует с диаметром рабочей поверхности сварочных электродов, от которого, в свою очередь зависит температурная обстановка на участке «электрод-электрод». В условиях массового производства можно наблюдать интенсивный износ электродов, который приводит к изменению конфигурации и размеров их рабочих поверхностей. Интенсивность износа сварочного электрода определяется материалом свариваемых деталей, чистотой подготовки их поверхности, параметрами режима сварки, интенсивностью охлаждения электродов, материала самих электродов. При увеличении поверхности соприкосновения

сварочного электрода с металлом свариваемых деталей происходит уменьшение плотности сварочного тока и, следовательно, глубины проплавления. В свою очередь это приводит к возникновению непроваров из-за увеличения времени, требующегося для зарождения расплавленного ядра сварной точки [60]. При этом происходит уменьшение размеров литого ядра и прочности сварного соединения (рис. 3.3) [61]. Так, при сварке низкоуглеродистых сталей толщиной 2+2 мм и допустимой прочности на срез 1100 кг после сварки 205 точек допустимой прочности на срез удовлетворяет 77 % точек, 800 точек – 43 %, 1600 точек – 32 % [62].

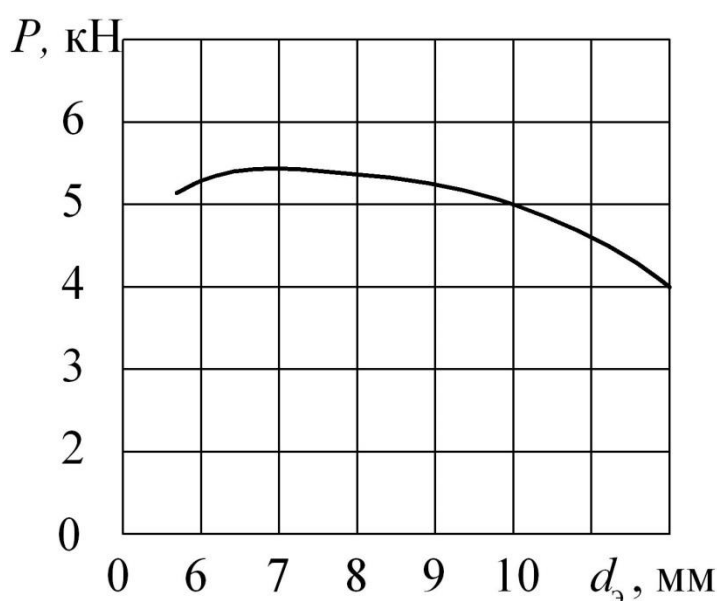


Рисунок 3.3 – Зависимость прочности сварных точек от диаметра электрода (сталь 08кп 1+1 мм) [61]

3.2 Особенности эксплуатации сварочных электродов в условиях массового производства

В металлургическом производстве в основном изготавливаются сплавы типа хромовой и хромоциркониевой бронзы, которые нашли наиболее широкое применение в различных странах в качестве материала для электродов контактных машин [63, 64]. В последнее время вместо дисперсионно-твердеющих хромовых и хромоциркониевых бронз, полученных литейным способом, все большее применение находят

дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУКМ) на основе меди (с добавками тугоплавких соединений), которые получают способом порошковой металлургии. Отличаясь комплексом уникальных свойств (высокая твердость, прочность, электропроводность), которые сохраняются и при высокой температуре, они существенно повышают эксплуатационную стойкость сварочного инструмента [65]. Наиболее эффективным способом введения оксидов в металлическую матрицу является внутреннее окисление [66]. Этот способ был реализован компанией «OMG Americas» (США) при разработке ДУКМ $\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$ торговой марки GlidCop [67]. Однако использование в мировой практике электродов из материала GlidCop Al-60 сдерживается в связи с достаточно высокой стоимостью этого материала, что обусловлено сложностью технологии его изготовления.

Интерес также представляют выпускаемые отечественной промышленностью конденсированные дисперсно-упрочненные материалы (КДУМ) на основе меди и молибдена, которые также имеют высокую твердость и электропроводность [68]. Их главным достоинством является высокая термическая стабильность – температура рекристаллизации достигает $1000\text{ }^\circ\text{C}$ [69]. Они изготавливаются как с объемным распределением молибдена (КДУМ), так и микрослойным, когда слои меди и молибдена чередуются (КМСМ).

Для оценки эксплуатационной стойкости существующих электродных материалов, изготовленных различными способами, при контактной точечной сварке оцинкованной стали выбраны материалы, физические свойства которых представлены в табл. 3.1. Из указанных материалов изготовлены электроды «колпачкового» типа. Электрод с рабочей частью из КДУМ и КМСМ получали приваркой пластин из этих материалов к медной заготовке ударной сваркой в вакууме. Предложена [70] методика ускоренных испытаний эксплуатационной стойкости электродных материалов при контактной точечной сварке оцинкованной стали, сокращающая расход свариваемой стали. Она заключается в следующем. Выполняется точечная

сварка низкоуглеродистой стали с антикоррозионным покрытием, нанесенным способом горячего цинкования, в этом случае толщина цинкового покрытия в 2...3 раза больше покрытия, нанесенного электрохимическим методом. Как известно из работы [71], чем больше толщина цинкового покрытия, тем меньше стойкость электрода. Кроме того, медный «хвостовик», на который надевается «колпачок», изготавливают без охлаждающего канала, что также снижает его стойкость при точечной сварке оцинкованной стали. Испытания проводили на машине для контактной точечной сварки марки МТ-22. Перед сваркой и после окончания испытаний измеряли диаметр отпечатка рабочей части поверхности электрода по отпечатку на белой бумаге через копирку (показателем стойкости является количество точек, сваренных до увеличения начального диаметра рабочей поверхности на 20 %). После сварки каждые 20 точек измеряли диаметр литого ядра путем сварки контрольной точки на образцах из той же оцинкованной стали шириной 40 мм и отрыва одной пластины относительно другой в одном направлении способом кручения в параллельной плоскости. После завершения испытаний для каждого электродного материала строили графики изменения литого ядра в зависимости от количества сваренных точек.

На рис. 3.4 представлены результаты сравнительных испытаний различных электродных материалов для точечной сварки горячеоцинкованной стали толщиной 0,5 мм (толщина покрытия 20...30 мкм) на режиме: $I_{св} = 4,5...5,0$ кА; $t_{св} = 5...6$ цикл; усилие сжатия 200 МПа.

Как видно из рис. 3.4, стойкость электродов из хромоциркониевой бронзы (Cu–Cr–Zr) производства Южной Кореи и Германии одинаковая и выше, чем у электродов из БрХЦр производства завода «Красный Выборжец» (РФ). Это связано с более высоким содержанием в нем циркония (около 0,1 мас. %) по сравнению с БрХЦр (0,06 мас. % Zr). Наибольшую стойкость показали биметаллические (наплавленные) электроды. Стойкость

электродов из нанокпозиционного материала С16.102 ДИСКОМ незначительно уступает наплавленным электродам.

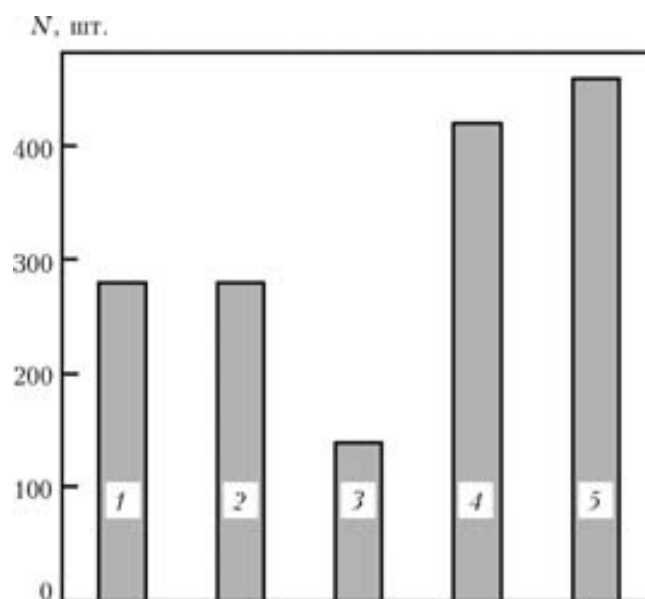


Рисунок 3.4 – Стойкость различных электродов (до первой переточки) при контактной точечной сварке горячеоцинкованной стали толщиной 0,5 мм (без охлаждающего канала в электроде) [70]: 1, 2 – хромоциркониевая бронза соответственно производства Германии и Южной Кореи; 3 – БрХЦр («Красный Выборжец», РФ); 4 – нанокпозиционный материал С16.102 ДИСКОМ; 5 – биметаллический электрод № 30 (ИЭС); N – количество сваренных точек

В результате предварительных испытаний электродов из ДУКМ (механическое легирование) установлено, что при сварке наблюдается значительный перенос электродного металла на оцинкованную сталь, что, по-видимому, и объясняет их невысокую стойкость (100 точек).

На рис. 3.5 представлены результаты испытаний, полученные при контактной точечной сварке горячеоцинкованной стали толщиной 0,8 мм с использованием неохлаждаемого электрода. Определено, что стойкость электрода с рабочей частью из КДУМ выше, чем из КМСМ.

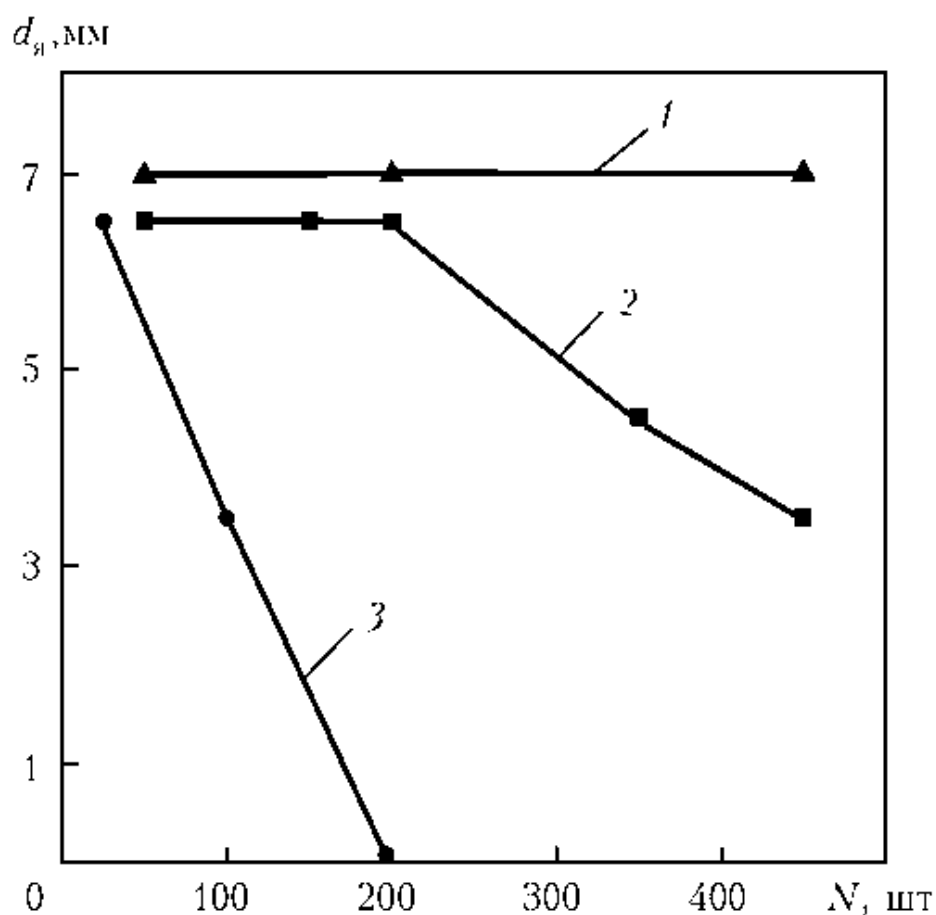


Рисунок 3.5 – Зависимость диаметра ядра сварной точки $d_{я}$ от количества сваренных точек N при контактной точечной сварке горячеоцинкованной стали толщиной 0,8 мм [70]: 1, 2 – биметаллический электрод с рабочей частью соответственно из КДУМ и КМСМ; 3 – электрод из хромовой бронзы БрХ

Как показывает практика, контактная сварка со стабилизацией сварочного тока приводит к постепенному уменьшению диаметра ядра вследствие износа сварочных электродов (рис. 3.6). Постепенное увеличение диаметра ядра сварной точки по мере износа может быть компенсировано ступенчатым увеличением значения сварочного тока. При этом неправильный выбор параметров такого ступенчатого увеличения тока может привести к непровару.

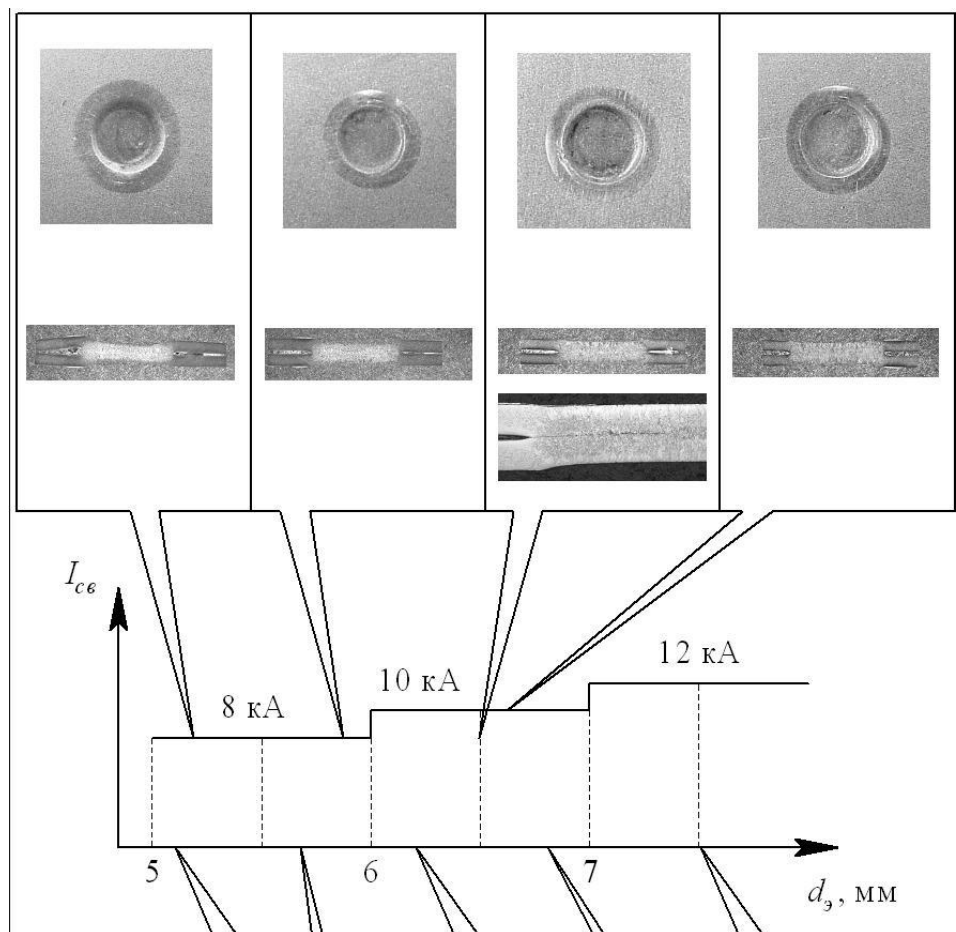


Рисунок 3.6 – Влияния износа сварочных электродов на качество контактной сварки в условиях ступенчатого увеличения сварочного тока 1+1 мм, сталь 08Ю

3.3 Компенсация износа электродов в условиях массового производства

Получить стабильное качество соединений при контактной точечной сварке в условиях интенсивного износа сварочных электродов можно путём проведения периодической зачистки сварочных электродов при выполнении наперёд заданного количества сварных точек [14, 72, 73]. Так, в случае сварки алюминиевых сплавов, до зачистки электродов можно выполнить 50...70 сварных точек, а до полного износа электродов – 1000...2000 сварных точек. В случае сварки низкоуглеродистых сталей до зачистки электродов можно выполнить 1000...2000 точек, а до полного износа электродов – 5000...7000 точек [74].

Повышение стабильности качества при контактной сварке в случае интенсивного износа сварочных электродов может быть достигнуто при автоматическом регулировании параметров режима сварки. При этом изменения параметров режима сварки должны компенсировать износ сварочных электродов. Ранее установлено, что компенсация изменения диаметра рабочей поверхности сварочных электродов может быть осуществлена при помощи коррекции силы сварочного тока [75]. Коррекция силы сварочного тока в простейшем случае предусматривает задание следующих параметров (рис. 3.7 а): шага приращения силы сварочного тока ΔI , количества N выполняемых сварок до следующего приращения силы тока и количество M интервалов этих приращений. После выполнения сварки по этому алгоритму следует произвести замену или зачистку электродов [76, 77, 78]. При более совершенном алгоритме происходит задание параметров ΔI и N для каждого интервала M (рис. 3.7 б) [79, 80, 81].

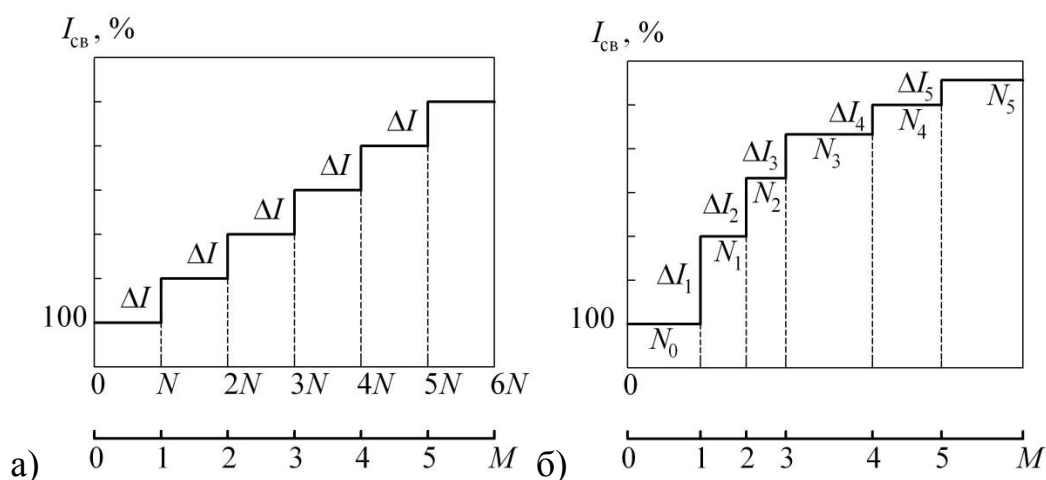


Рисунок 3.7 – Алгоритмы ступенчатого увеличения сварочного тока

В случае осуществления ступенчатого увеличения силы сварочного тока без информации о диаметре рабочей поверхности электродов повышается вероятность выплесков и непроваров из-за расхождения ожидаемого и действительного износов. Для того, чтобы этого избежать, корректируют сварочный ток на основании информации о сопротивлении сварной точки [58, 82, 83].

4 Автоматическое управление контактной точечной сваркой в условиях возмущений

4.1 Обзор способов управления контактной сваркой в условиях действия возмущений

4.1.1 Стабилизации тока во вторичном контуре

Наибольшее распространение получил способ стабилизации сварочного, который успешно применяется уже в течение многих лет. Широкое применение этого способа связано с его универсальностью. Характерными причинами, нарушающими нормальное течение процесса, являются: колебания напряжения питающей сети, внесение магнитных масс в сварочный контур, значительный разогрев медных деталей токопровода и т.п.

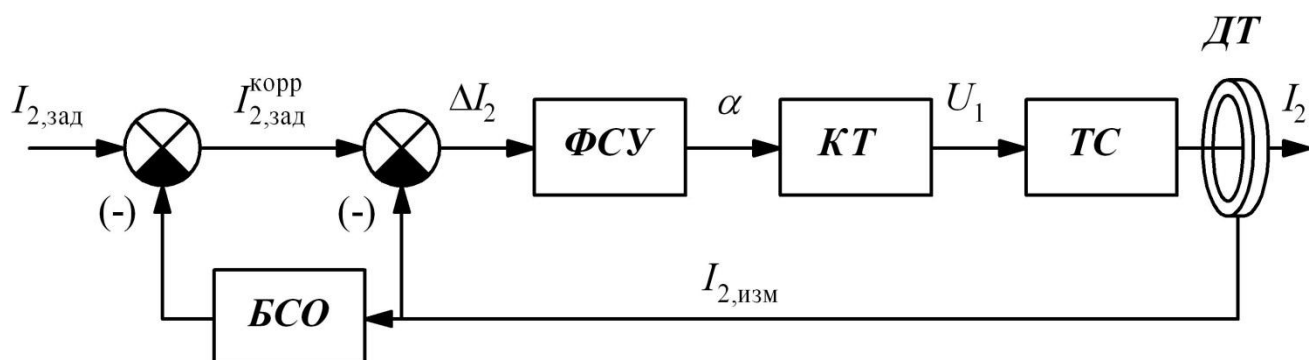
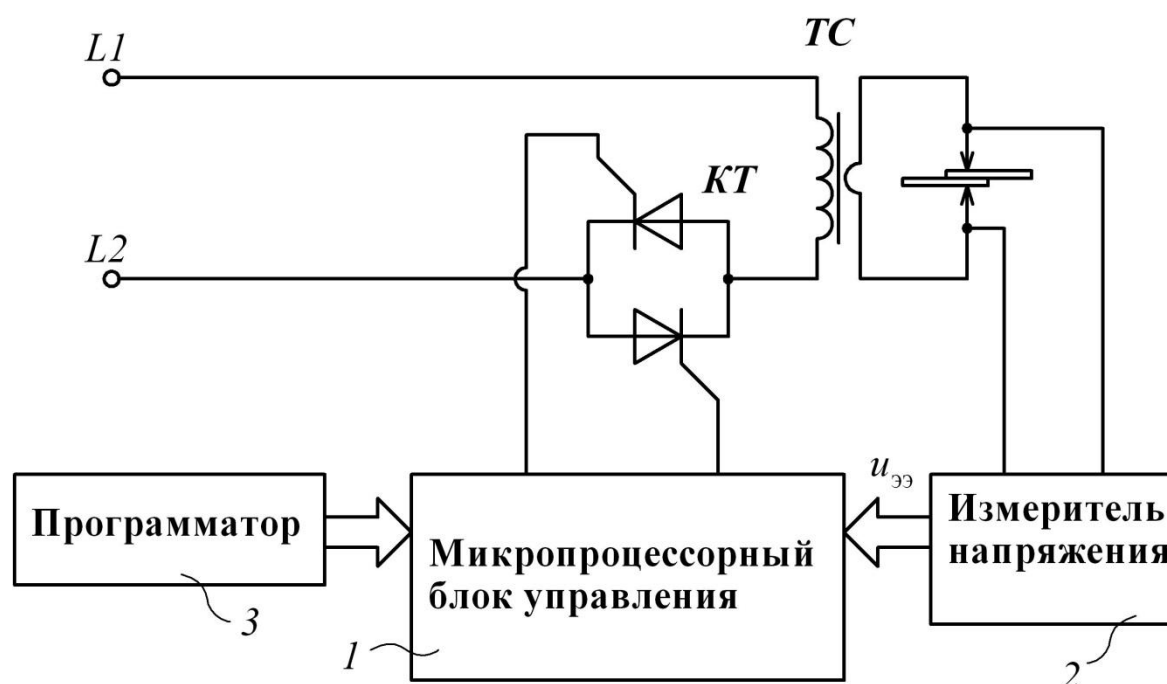


Рисунок 4.1 – Стабилизация сварочного тока с учетом измерений
в предыдущих периодах

Возмущения, действующие при контактной сварке на однофазных машинах, можно полностью компенсировать, стабилизировав действующее значение сварочного тока [3, 14, 84, 60]. В этом случае стабилизация сварочного тока будет эффективной. Однако, если возмущение изменяют диаметр ядра сварной точки, то тем самым изменяется плотность тока, тогда неизменное значение величины $I_{св}$ не гарантирует стабильного качества [60].

4.1.2 Системы управления по напряжению между электродами

Применение стабилизатора напряжения на электродах $U_{эз}$ в этих случаях более перспективно с точки зрения своевременного «исправления» процесса. Однако связи между параметрами, которые позволяют автоматически опознать ситуацию и откорректировать процесс с помощью стабилизатора $U_{эз}$, вызывают изменения тока, ухудшающие процесс при самопроизвольном, не предусмотренном заранее, изменении толщины деталей [58].



1 – микропроцессорный блок управления; 2 – измеритель напряжения;
3 – программатор; КТ - тиристорный контактор

Рисунок 4.2 - Система управления контактной сваркой по напряжению $u_{эз}$

Проблема измерения активного падения напряжения на сварочном контакте состоит в трудности выделения полезного сигнала из сигнала помехи – ЭДС взаимной индукции, наводимой сварочным током в измерительной цепи. Падение напряжения на свариваемых деталях обычно снимают с концов электродов машины. Провода измерительной цепи не должны сокращать размеры рабочего пространства вторичного контура

сварочной машины, поэтому их прокладывают по ее токоведущим частям. Следствием этого является то, что напряжение наводки на измерительных проводах от сварочного тока соизмеримо или в большинстве случаев превышает активное падение напряжения на сварочном контакте [87]. Известен способ автоматического регулирования процесса контактной сварки, основанный на измерении активной составляющей падения напряжения на электродах с компенсацией напряжения наводки, при котором напряжение наводки измеряют в режиме короткого замыкания машины и запоминают, а его компенсацию производят в процессе выполнения сварки путем вычитания запомненного напряжения наводки из суммарного напряжения между электродами машины [86, 87].

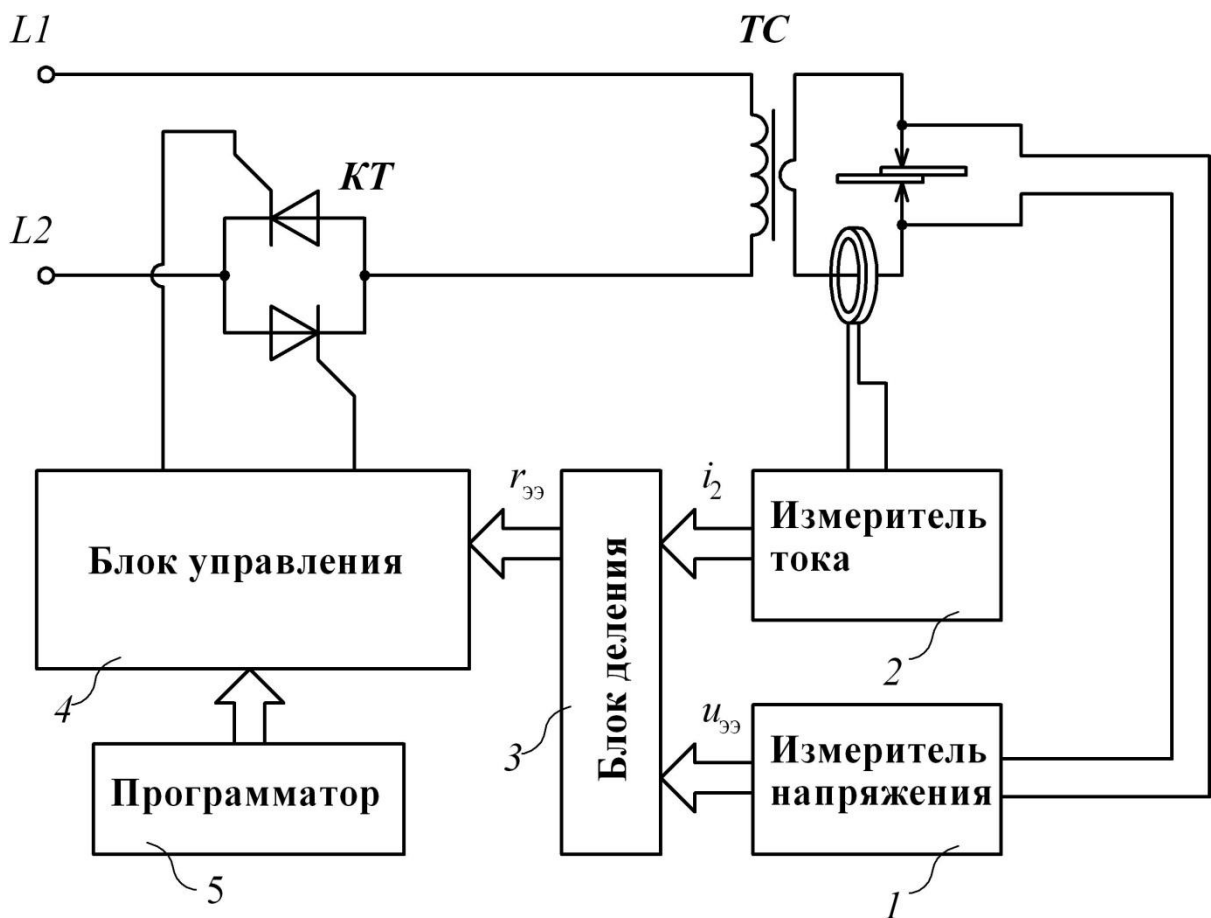
4.1.3 Системы управления по сварочному сопротивлению

В системах управления по сопротивлению участка «электрод-электрод» (рис. 4.4) используется понятие о некоторой «идеальной» кривой сопротивления, задание которой происходит в виде таблицы для каждого полупериода тока сварки [88, 89]. Эту «идеальную» кривую снимают при сварке деталей без возмущений и с получением качественного соединения. При сварке в реальных условиях в каждом полупериоде измеряют текущее значение сопротивления $R_{\text{эз}}$ участка «электрод-электрод». Коррекцию режима сварки осуществляют таким образом, чтобы реальная кривая сопротивления была как точнее соответствовала «идеальной» кривой изменения сопротивления. В случае отклонения измеренного сопротивления от заданного табличного значения на величину более допустимой, сварку считают дефектной.

Существует способ управления сваркой [90], при котором величину тока подогрева задают обратно пропорционально сопротивлению между электродами, измеренному в период действия предварительного импульса тока. Ток подогрева выключают, когда приращение сопротивления по абсолютной величине станет меньше заданного значения. Величину

сварочного тока задают прямо пропорционально сопротивлению, измеренному в конце импульса тока подогрева, а его длительность – пропорционально квадрату величины этого сопротивления.

Известен способ [88] с плавным нарастанием тока сварки, при котором измеряют сопротивление между электродами и по величине измеренного сопротивления управляют сварочным током. В процессе нарастания сварочного тока определяют экстремальную точку максимальной величины сопротивления, фиксируют ее, после чего продолжают сварку без изменения величины сварочного тока.



1 – измеритель напряжения; 2 – измеритель тока; 3 – блок деления; 4 – блок управления; 5 – программатор; КТ - тиристорный контактор

Рисунок 4.3 – Система управления по динамическому сопротивлению участка «электрод-электрод»

4.1.4 Системы управления по выделяющейся энергии на сварочном участке

Разработан способ регулирования электронагрева сварного соединения, при котором измеряют электрическую энергию, выделяемую в сварочном контакте с момента подачи сварочного тока до текущего момента времени и производят отключение тока при достижении электрической энергией заданного значения [91]. Величину электрической энергии в сварочном контакте получают путем измерения суммы двух сигналов, один из которых пропорционален фактическому времени протекания сварочного тока, а другой сигнал обратно пропорционален среднему за время сварки сопротивлению контакта, а заданное значение энергии определяют как сумму этих сигналов и постоянной величины, определяемой выбранном режимом сварки.

Известен способ управления контактной сваркой [92], который заключается в том, что в процессе сварки контролируют величину сварочного тока и напряжения между электродами, интегрируют произведение этих величин, характеризующее энергию, выделяемую в сварочном контакте, и сравнивают с заданным значением параметра, определенного опытным путем. Интегрирование начинают в момент времени, когда скорость изменения сопротивления между деталями достигнет заданного значения.

Общим недостатком всех систем управления, использующих измерение электрических параметров процесса, характеризующих формирование соединения при контактной сварке, является необходимость использования датчиков, которые загромождают рабочее пространство. Также требуется проведение мероприятий по борьбе с электромагнитными помехами, возникающими при включении сварочного тока.

4.2 Система автоматического управления контактной сваркой в условиях возмущений

Задача, на решение которой направлено проектируемая система автоматического управления контактной точечной сваркой, заключается в повышении качества контактной точечной сварки путём получения заданных геометрических размеров точечно-сварного соединения независимо от состояния электродов и поверхности свариваемых деталей за счёт стабилизации тепловыделения в промежутке электрод-электрод.

Поставленная задача может быть решена тем, что в предлагаемом способе автоматического управления контактной сваркой в условиях возмущений происходит определение коэффициента мощности $\cos \varphi$ и величины тепловыделения за период сварочного тока в промежутке «электрод-электрод». В случае отклонения этого значения от заданного принимают решение на корректировку угла включения тиристоров α_{i+1} в следующем периоде. В качестве контролируемого параметра при управлении используется длительность включенного состояния тиристоров λ . В каждом периоде сетевого напряжения с учётом заранее заданных параметров электрической характеристики контактной машины производится вычисление коэффициента регулирования сварочного тока по формуле:

$$k_i = a_1 \cdot \alpha_i + a_0, \quad (4.1)$$

где α_i – принятый угол открытия тиристоров в текущем периоде; a_1 и a_2 – коэффициенты, определяемые эмпирически.

Далее вычисляют действующее значение тока во вторичном контуре I_2 и сопротивление участка электрод-электрод $r_{\text{ээ}}$ по формулам:

$$I_2 = \frac{U_{20}}{X_{2\kappa}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \cdot k_i, \quad (4.2)$$

$$r_{\text{ээ}} = \frac{\cos \varphi \cdot X_{2\kappa}}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} - R_{2\kappa}, \quad (4.3)$$

где $R_{2к}$ и $X_{2к}$ - суммарные активное и индуктивное сопротивление вторичного контура, Ом; U_{20} - вторичное напряжение холостого хода на данной ступени трансформатора, В.

Далее находят тепловыделение в текущем периоде по формуле:

$$q_i = (I_2)^2 \cdot r_{\Sigma} \cdot 0,02, \quad (4.4)$$

и по результату этих расчётов принимают решение о корректировке угла открытия тиристорov α_{i+1} в следующем периоде по формуле:

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i \cdot \sqrt{\frac{q}{q_i}} + \frac{a_0}{a_1} \left(\sqrt{\frac{q}{q_i}} - 1 \right), \quad (4.5)$$

где q – заданное тепловыделение за период, Дж.

Коэффициенты a_1 и a_0 можно определить в зависимости от $\cos \varphi$ из следующих выражений:

$$a_0(\cos \varphi) = 2,138 \cdot \cos^2 \varphi - 3,443 \cdot \cos \varphi + 2,872, \quad (4.6)$$

$$a_1(\cos \varphi) = -0,900 \cdot \cos^2 \varphi + 1,490 \cdot \cos \varphi - 1,173, \quad (4.7)$$

Следует отметить, что для определения тепловыделения q_i может быть получено семейство аппроксимирующих зависимостей, использование которых позволит упростить расчёты по формулам (4.1)...(4.5) при их проведении на микропроцессорной системе управления.

Использование в качестве измеряемого параметра обратной связи длительности включенного состояния тиристорov λ позволяет упростить систему управления за счёт того, что перестаёт быть необходимым проведение начальной тарировки датчиков и обеспечение их защиты от помех. Это объясняется тем, что при осуществлении предлагаемого способа измеряют не абсолютное значение сварочного тока, а длительность его протекания. Также следует принять во внимание, что наличие электромагнитных помех таком случае не окажет влияния на точность измерений, что объясняется тем, что время существования этих помех совпадает с измеряемой длительностью протекания сварочного тока.

Измерения могут производиться в первичном контуре контактной машины, что существенно расширяет область применения предлагаемого способа.

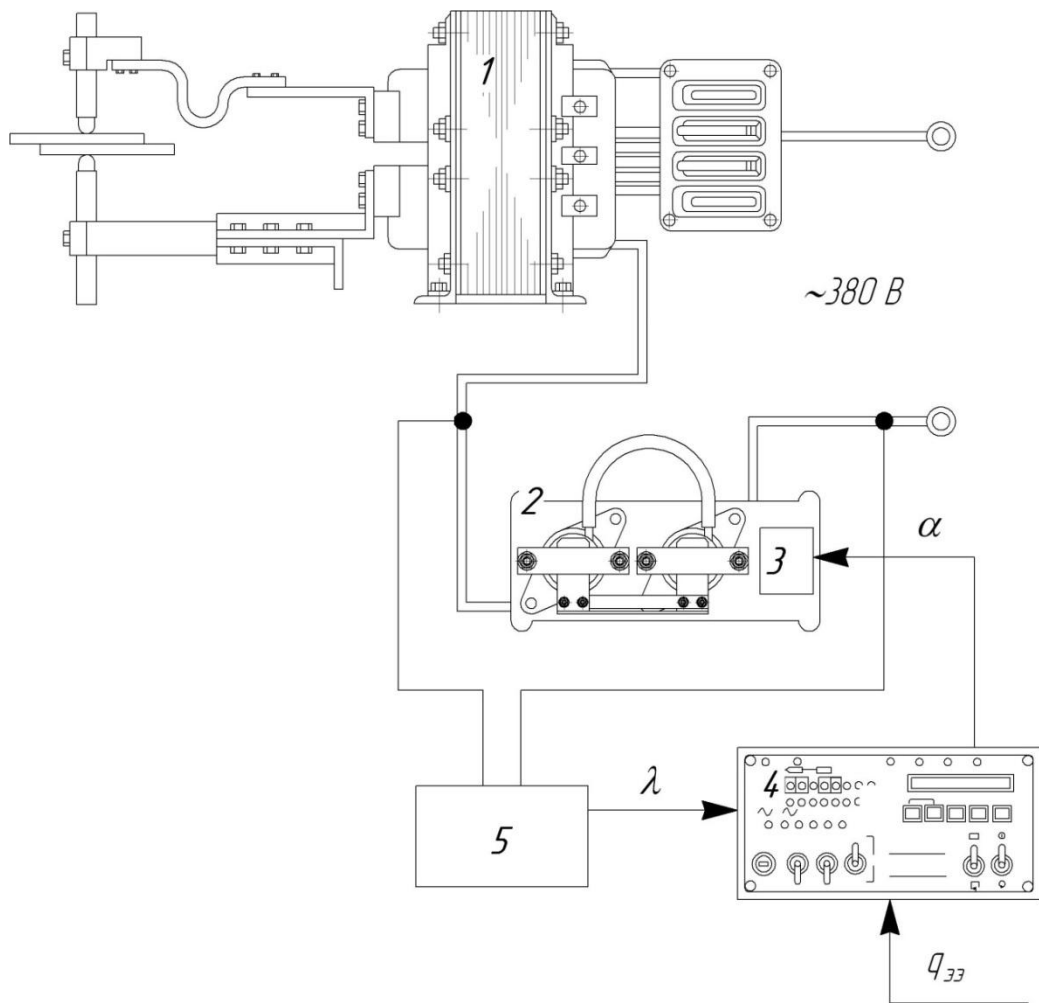
Вычисление коэффициента регулирования сварочного тока по формуле (4.1) позволяет упростить проведения расчётов и повысить их точность по сравнению с существующими аналогами.

Вычисление тепловыделения в текущем периоде сварочного тока по формулам (4.2)...(4.4) позволяет получать данные о тепловой обстановке на участке электрод-электрод без использования непосредственных измерений, что существенно упрощает процесс контроля.

Принятие решения о корректировке угла открытия тиристорov α_{i+1} в следующем периоде сварочного тока с использованием формулы (4.5) позволяет за счёт учёта возмущающих воздействий стабилизировать тепловыделение в промежутке электрод-электрод. Определение коэффициентов a_1 и a_0 в зависимости от $\cos \varphi$ из выражений (4.6) и (4.7) даёт возможность вычислять k_i с погрешностью до 2 %, что является достаточным для обеспечения регулирования процесса контактной точечной сварки.

Таким образом, вычисление в каждом периоде сетевого напряжения тепловыделения на участке «электрод-электрод» и регулирование угла открытия тиристорov по предлагаемым формулам позволяет повысить качество выполняемого точечно-сварного соединения, избежать непроваров и выплесков независимо от качества подготовки поверхности и степени износа рабочей поверхности электрода (возможно увеличение диаметра до 50% от начального).

Реализация способа происходит на стандартных машинах контактной сварки, которые работают от сети переменного тока промышленной частоты, содержащих (рис. 4.4) сварочный трансформатор 1, первичная обмотка которого подключена к сети через блок тиристорov 2, управление работой которого осуществляется регулятором сварки 4 через блок поджига 3. Система управления оснащена также датчиком обратной связи 5, который измеряет длительность λ включения тиристорov.



1 - трансформатор сварочный; 2 - контактор тиристорный; 3 - блок поджига тиристоров; 4 - регулятор контактной сварки; 5 - датчик включения тиристоров; 6 - датчик напряжения на электродах; 7 - датчик тока

U_{20} - вторичное напряжение холостого хода сварочного трансформатора, В;

$q_{ээ}$ - заданное тепловыделение на участке "электрод-электрод", Дж;

α - угол открытия сварочных тиристоров, град;

λ - длительность включенного состояния тиристоров, град;

$u_{ээ}$ - падение напряжения на участке "электрод-электрод", В;

i_2 - вторичный ток, А

Рисунок 4.4 – Система автоматического управления контактной сваркой

Способ управления контактной точечной сваркой в условиях действия возмущений осуществляется следующим образом.

Перед сваркой в регулятор 4 закладывается заранее определённые суммарные активное $R_{2к}$ и индуктивное $X_{2к}$ сопротивления вторичного контура, вторичное напряжение U_{20} холостого хода трансформатора, а также длительность $t_{св}$ протекания сварочного тока и выделяемая за период сварочного тока мощность $q_{ээ}$. В процессе сварки датчик 5 измеряет длительность включения тиристоров λ в положительном полупериоде сварочного тока и отправляет сигнал в регулятор 4, где производится вычисление с учётом принятого в данном периоде угла открытия тиристоров α_i коэффициента мощности $\cos \varphi$. За время отрицательного полупериода сварочного тока регулятор по формулам (4.2)...(4.4) вычисляет выделяемое в сварочном промежутке за данный период количество тепла и по формуле (4.5) требуемый угол α_{i+1} открытия тиристоров для следующего периода.

Пример. При сварке листовых деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 1+1 мм на контактной сварочной машине типа МТ-4017 были введены в регулятор следующие значения: суммарное активное сопротивление контура 60 мкОм, суммарное индуктивное сопротивление контура 180 мкОм, вторичное напряжение холостого хода $U_{20}=2,50$ В, заданное тепловыделение за период сварочного тока $q=180$ Дж и время сварки $t_{св}=0,12$ с (6 периодов). Изменение сопротивления $r_{э-э}$ промежутка электрод-электрод (рис. 4.5) в процессе сварки при номинальном диаметре рабочей поверхности электродов, равном 5 мм, и увеличенном вследствие износа диаметре, равном 8 мм, представлено соответственно кривыми 1 и 2. При этом стабилизация тепловыделения q_i за период сварочного тока (рис. 4.6) с использованием предлагаемого способа (кривые 1 и 2) позволяет получить качественные соединения в обоих случаях. В то же время сварка без использования стабилизации тепловыделения (кривые 1' и 2') сопровождается уменьшением тепловыделения при изношенных электродах.

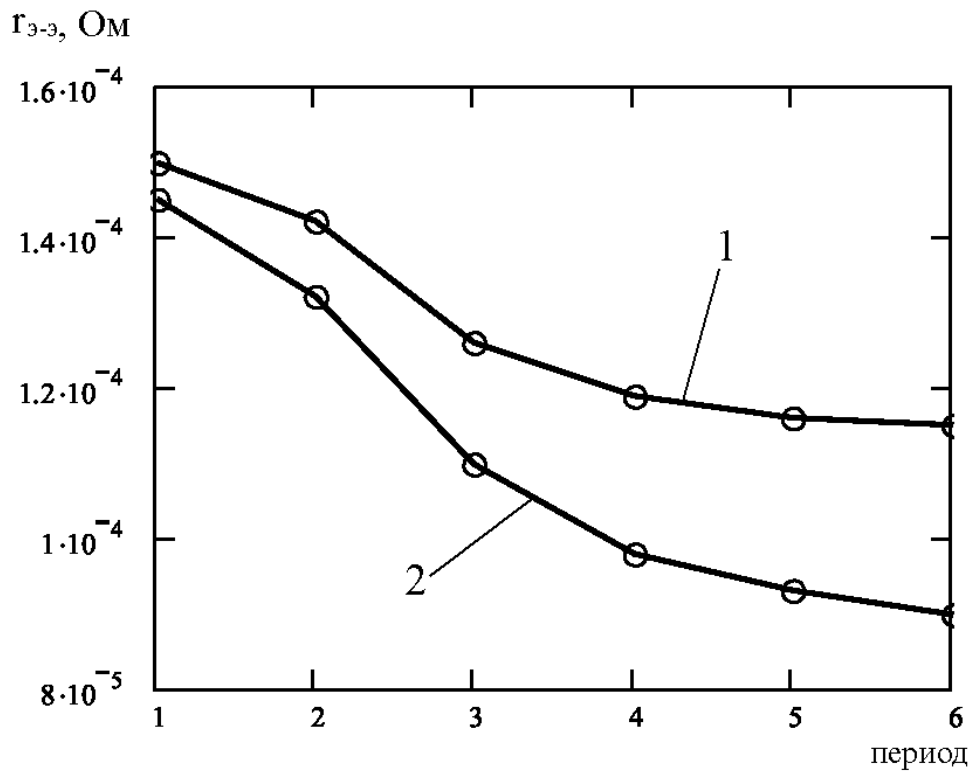


Рисунок 4.5 – Изменение сопротивления $r_{э-э}$ промежутка электрод-электрод

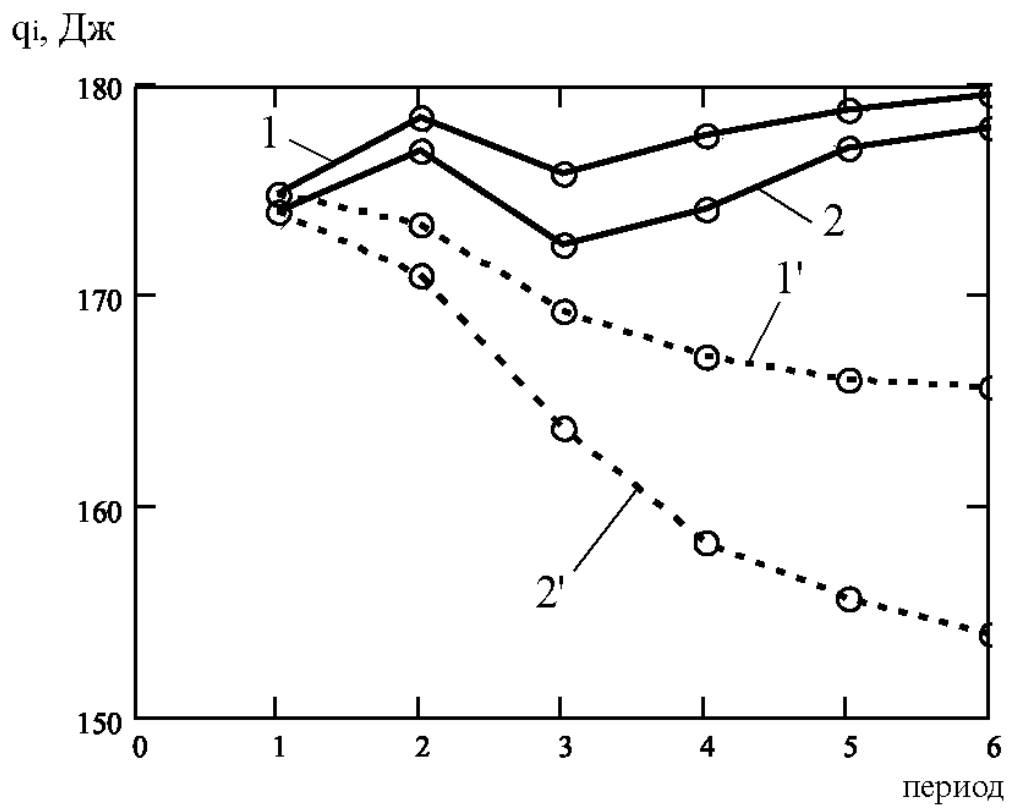


Рисунок 4.6 – Тепловыделение за период сварочного тока

Критерием качества процесса в данном случае является отсутствие следов выплеска металла из сварной точки и из-под сварочных электродов, образование зоны взаимного расплавления диаметром не менее номинального для данной толщины образцов.

После сварки произвели визуальный осмотр сваренных образцов, при котором обнаружено отсутствие выплесков. При разрушении образцов определён диаметр ядра сварной точки, который оказался равным требуемому по ГОСТ 15878-79. Установлено, что размеры зоны взаимного расплавления деталей не зависят от подготовки поверхности и величины износа сварочных электродов. Таким образом, предлагаемый способ управления контактной точечной сваркой в условиях действия возмущений позволяет стабилизировать энерговыделение на участке «электрод-электрод», избежать появления непроваров и выплесков, получить стабильное качества точечно-сварных соединений независимо от характеристики конкретной сварочной машины и износе сварочных электродов до 50 % от номинального.

4.3 Устройство для компенсации износа электродов при контактной точечной сварке

Предлагаемое устройство (рис. 4.7) содержит следующие элементы:

- датчик износа рабочей части электродов 1;
- блок задания времени сварки 2;
- блока регулятора давления электродов 3;
- нелинейный квадратирующий преобразователь 4;
- блок измерения толщины свариваемых деталей 5;
- стабилизатор падения напряжения между электродами 6;
- тиристорный контактор 7;
- реле времени 8;
- датчик давления 9;

- электропневматические клапана 10, 11 и 12;
- редукционный клапан 13;
- управляющие контакты 14, 15 и 16.

Первый выход датчика 1 подключен к соответствующему входу блока задания времени 2, второй выход соединен с входом блока 3 регулятора давления электродов. Входы блока задания времени 2 и блока регулятора давления электродов 3 подключены к выходу нелинейного квадратирующего преобразователя 4. Вход преобразователя 4 соединен с блоком 5 измерения толщины свариваемых деталей. Кроме того, выход блока задания времени сварки 2 соединен со входом регулятора 3 давления электродов, который соединен со входом стабилизатора падения напряжения между электродами 6 и который соединен с контактором 7, вход которого соединен с выходом реле времени 8. В свою очередь, вход реле времени 8 соединен с третьим выходом датчика износа. Блок 3 регулятора давления электродов связан с датчиком давления 9, электропневматическими клапанами 10, 11 и 12 и редукционным клапаном 13. Реле клапанов 10...12 соединены последовательно с контактами 14...16.

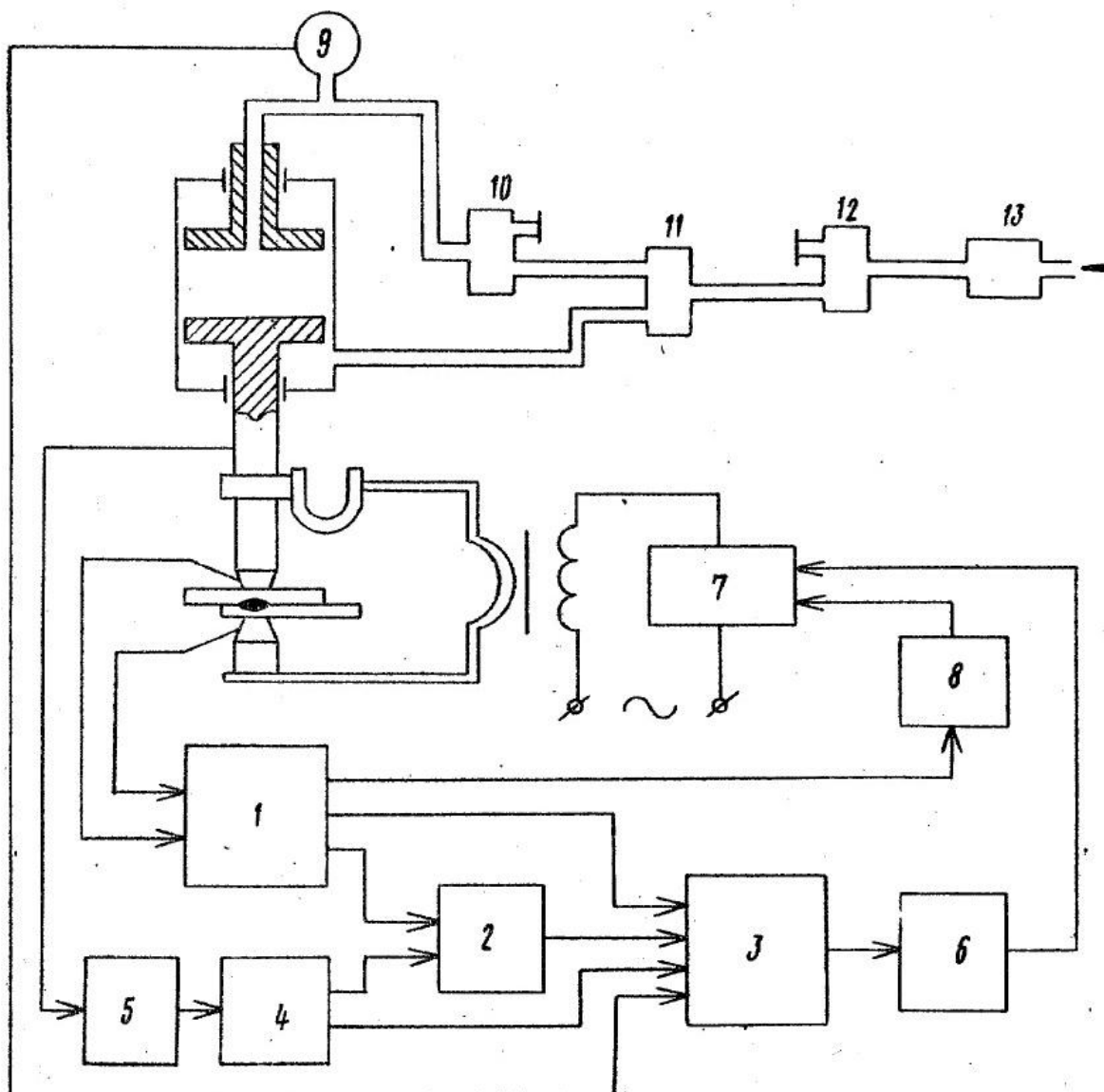
Датчик 1 износа рабочей части электродов преобразует физическую величину износа в пропорциональный ей электрический сигнал, который используется в качестве управляющего работой блока задания времени сварки 2 и регулятора 3 давления электродов. Блок 5 измерения толщины свариваемых деталей измеряет перемещение верхнего электрода относительно нижнего и вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный толщине свариваемых деталей, при этом вносится погрешность измерений за счет износа рабочей части электродов. Этот сигнал обрабатывается нелинейным квадратирующим преобразователем 4 и используется в качестве управляющего работой блока задания времени сварки 2 и регулятора давления электродов. Управляющий сигнал датчика износа 1 компенсирует погрешность, которая возникает в управляющем сигнале преобразователя 4 из-за износа в процессе сварки рабочей части

электродов, определяя тем самым время прохождения сварочного тока $t_{св}$ (рис. 4.5) и усилие на сварочных электродах $F_{ков}$ и $F_{св}$ (рис. 4.4).

Для расширения функциональных возможностей устройства управляющий сигнал датчика 1 износа рабочей части электродов подается на реле времени 8 и пропорционально степени износа рабочей части электродов изменяет угол отпирания α тиристорного контактора (рис. 4.5). Такое использование сигнала датчика износа 1 автоматически компенсирует падение плотности тока в сварочном контакте, которое является следствием износа электродов.

Предлагаемая система управления работает следующим образом. В исходном состоянии все клапаны отключены, и сжатый воздух через клапаны 11 и 12 подается в нижнюю камеру пневматического цилиндра, при этом верхний электрод поднят. При нажатии педали "сварка» замыкается контакт 16 и срабатывает клапан 11. В результате этого сжатый воздух с давлением, определяемым редукционным клапаном 13, подается в среднюю камеру, а нижняя камера соединяется с атмосферой через клапан 11. Электрод опускается, и через некоторое время на электродах развивается усилие $F_{ков}$ (рис. 4.8). Через время t_1 , задаваемое при помощи реле времени 8, замыкается контакт 15. Срабатывает клапан 12, переключая выход редукционного клапана 13 и соединяя среднюю камеру пневматического цилиндра через клапаны 10...12 с атмосферой. В результате этого давление в средней камере, а, следовательно, и усилие на сварочных электродах начинает падать. При заданном значении усилия на электродах $F_{св}$ (рис. 3.5) регулятор 3 давления электродов получает управляющий сигнал от преобразователя 4 и с соответствующей поправкой за счет управляющего сигнала датчика износа 1 замыкается контакт 14. Это срабатывание происходит при усилии на электродах $F_{св}$, величина которого пропорциональна квадрату действительной толщины свариваемых деталей. Контакт 14 включает клапан 10, в результате чего средняя камера пневмоцилиндра переключается, и усилие на электродах фиксируется на уровне $F_{св}$. Через время t_3 (рис. 3.5),

задаваемое реле времени 8, контакты 15 и 16 отключаются, и схема приходит в исходное состояние.



1 – датчик износа рабочей части электродов; 2 – блок задания времени сварки; 3 – блок регулятора давления электродов; 4 – нелинейный квадратирующий преобразователь; 5 – блок измерения толщины свариваемых деталей; 6 – стабилизатор падения напряжения между электродами; 7 – тиристорный контактор; 8 – реле времени; 9 – датчик давления; 10...12 – электропневматические клапаны; 13 – редукционный клапан; 14...16 – управляющие контакты

Рисунок 4.7 – Блок-схема устройства для автоматического управления контактной сваркой

Применение устройства для автоматического управления режимом точечной контактной электросварки позволяет компенсировать погрешности измерений датчика свариваемых деталей. За счет применения управления углом открытия сварочных тиристоров с использованием управляющего сигнала от датчика износа электродов достигнута более плавная регулировка вводимой в сварочный контакт энергии, что позволяет снизить на 35% количество выплесков и прожогов, а также экономить электроэнергию, компенсировать явление падения плотности тока в сварочном контакте, которое является следствием износа электродов, что позволяет на 40% увеличить рабочий ресурс электродов до очередной их зачистки или смены, что способствует росту производительности сварочного оборудования на 6...8%.

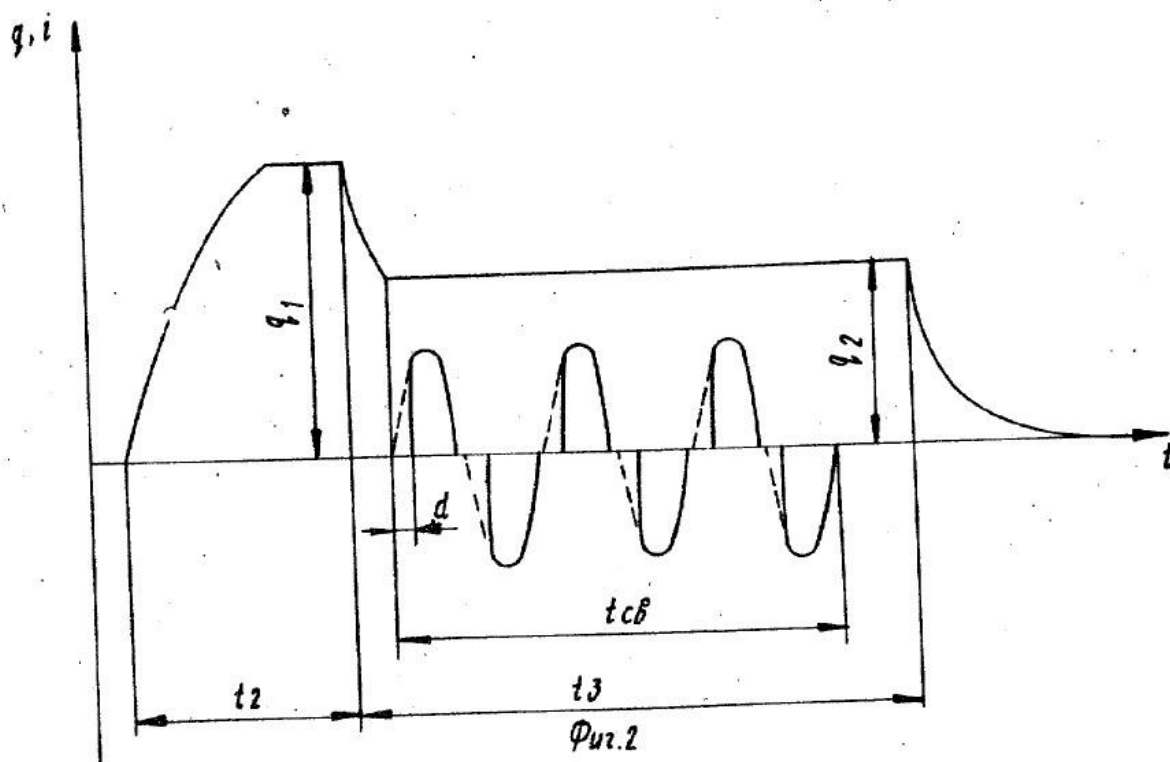


Рисунок 4.8 – Диаграмма развиваемого сварочного усилия и сварочного тока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании поставлена цель – повышение производительности и качества контактной точечной сварки в условиях действия возмущений.

На основании анализа возмущений при контактной сварке, в котором были рассмотрены: колебания напряжения питающей сети; изменение сопротивления вторичного контура сварочной машины; изменение условий сжатия деталей сварочными электродами; изменение размеров рабочей поверхности электродов; изменение сопротивления свариваемых деталей; шунтирование сварочного тока; **самым опасным возмущением признано изменение размеров рабочей поверхности электродов.**

Цикл жизни электрода целесообразно разбить на три характерных участка, первый участок – приработка, второй участок – установившийся износ, третий участок – катастрофический износ. Длительность каждого участка зависит от параметров режима, материала свариваемых деталей и электродов, интенсивности выполняемой сварки. При этом использование новых перспективных электродных материалов позволяет продлить срок службы электродов до переточки и повысить стабильность качества сварки в условиях износа электродов.

Постепенное увеличение диаметра ядра сварной точки по мере износа может быть компенсировано ступенчатым увеличением значения сварочного тока. При этом неправильный выбор параметров такого ступенчатого увеличения тока может привести к непровару.

Общим недостатком всех систем управления, использующих измерение электрических параметров процесса, характеризующих формирование соединения при контактной сварке, является необходимость использования датчиков, которые загромождают рабочее пространство. Также требуется проведение мероприятий по борьбе с электромагнитными помехами, возникающими при включении сварочного тока. В

диссертационном исследовании предложен новый способ управления контактной сваркой в условиях действия возмущений, который позволяет стабилизировать энерговыделение на участке «электрод-электрод», избежать появления непроваров и выплесков, получить стабильное качества точечно-сварных соединений независимо от характеристики конкретной сварочной машины и износе сварочных электродов до 50 % от номинального.

На основании вышеизложенного поставленную цель диссертационного исследования можно считать достигнутой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Кочергин К. А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
- 2) Чулошников П. Л. Контактная сварка. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
- 3) Климов А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышению стабильности качества. – М.: Физматлит, 2011. – 216 с.
- 4) Шаповалов, Е.В. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой / Е.В. Шаповалов, Р.М. Галаган, Ф.С. Клишар, В.И. Запара // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 1. – С. 10–22.
- 5) Сварка. Резка. Контроль. Справ. В 2-х т. Т. 2 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, А. И. Акулов и др. // Под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
- 6) Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки. — М: Машиностроение, 1985. – 254 с.
- 7) Connie R., Warren P. Inspecting RSW electrodes and welds with laser-based imaging // Welding J. – 2007. – 86, № 2. – P. 38–45.
- 8) Development of an automatic weld surface appearance inspection system using machine vision / Lin Sanbao, Fu Xibin, Fan Chenglei, et.al. // China weld. – 2009. – № 3. – P. 74–80.
- 9) Rethmeier M., Brauser S., Weber G. Potential of optical strain field measurement for the characterization of the properties of resistance-spot-welded joints // Welding and Cutting. — 2011. — № 1. — P. 48–52.
- 10) Francis D., Tatam R. P., Groves R. M. Shearography technology and applications: a review // Measurement Sci. and Technology. — 2010. — 21, № 10. — 29 p.

11) Findeis D., Gryzagoridis J., Asur E. Phase unwrapping applied to portable digital shearography [Электрон. ресурс] // CD-Proc.: IV Pan American conf. for Non Destructive Testing: 22–26 Oct. 2007, Buenos Aires, Argentina.

12) Методика, технология и аппаратура широкографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 3. — С. 25–28.

13) Оперативна діагностика зварних точкових з'єднань методом електронної широкографії з використанням механічного та термічного навантаження / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, . В. Киянець та ін. // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Мат. 7-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки, 20–23 лист. 2012. — Київ, 2012. — С. 378–382.

14) Технология и оборудование контактной сварки: Уч. для машиностр. вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др. // Под общ. ред. Б. Д. Орлова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.

15) Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. II. Технология и оборудование. Справ. изд. / Под ред. В. М. Ямпольского. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. — 574 с.

16) Дерун Е. Н. Вихретоковый контроль точечных сварных соединений. — Старая Русса: СПК (филиал) НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2010. — 142 с.

17) Пат. 2029295 РФ, МПК6 G01N27/83. Способ магнитного контроля точечных сварных соединений / С. Ф. Мельников, В. П. Березиенко, И. В. Королев, В. Л. Искров. — Заявл. 19.07.1992; опубл. 20.02.1995. — 3 с.

18) A magnetic sensor array for spot welding quality monitor / Wang Rui, Luo Zhen, Shan Ping et al. // China Welding. — 2010. — 19, № 3. — P. 70–73.

19) A New Perspective on Magnetic Field Sensing / M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith, R. Schneider // Sensors Magazine. — 1998. — 15, № 12. — P. 34–46.

20) Дубов А. А., Колокольников С. М. Проблемы контроля качества сварки и их решение на основе метода магнитной памяти металла // Технология машиностроения. — 2005. — № 4. — С. 43–47.

21) ГОСТ Р ИСО 24497-1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 1. Термины и определения. — Взамен ГОСТ Р 52081-2003; Введ. 01.12.2010. — М.: Стандартиформ, 2010. — 7 с.

22) О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций / М. Б. Аркулис, М. П. Барышников, Н. И. Мишенева, Ю. И. Савченко // Дефектоскопия. — 2009. — № 8. — С. 10–12.

23) Куликов В. П., Болотов С. В. Магнитно-тепловой метод контроля сварных соединений, полученных контактной точечной сваркой // Свароч. пр-во. — 2003. — № 9. — С. 16–20.

24) Магнитооптическая дефектоскопия изделий и соединений из ферромагнитных сталей / Ю. С. Агалиди, С.В. Левый, В.А. Троицкий, Ю. Н. Посыпайко // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Матеріали 6-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки, 9–12 червня 2009. — Київ, 2009. — С. 63–66.

25) Пат. 2159426 РФ, МПК7 G01N27/82, G01N27/83. Способ магнитооптического контроля изделия / С. В. Левый, Ю. С. Агалиди. — Заявл. 25.10.1999; опубл. 20.11.2000. — 7 с.

26) Банов М. Д. Технология и оборудование контактной сварки: уч. для студ. учр. сред. проф. образования. — 3-е изд., стер. — М.: Издат. центр «Академия», 2008. — 224 с.

27) Зуев В. М., Табакман Р. Л., Удралов Ю. И. Радиографический контроль сварных соединений. — СПб.: Энергоатомиздат, 2001. — 148 с.

28) Меньшиков Г. А. Опыт и перспективы использования методов контроля точечной контактной сварки при производстве изделий ответственного назначения // Сварка и контроль-2004 / Матер. Всерос. с межд. участием науч.-техн. конф., посвященной 150-летию со дня рождения

Н.Г. Славянова: Теория сварки, 17–20 мая 2004. — Пермь, 2004. — С. 324–327.

29) Григорченко С. А., Капустин В. И. Классификация дефектов при автоматизированном радиографическом контроле сварных соединений // Дефектоскопия. — 2009. — № 9. — С. 73–87.

30) Фомин А. А., Жизняков А. Л. Оценка качества сварных соединений по многомасштабному образу рентгенограмм // Тяжелое машиностроение. — 2010. — № 6. — С. 19–23.

31) Fr. Stefan The evolution of weld inspection in the automotive industry // Welding J. — 2009. — 88, № 8. — P. 52–53.

32) Гугунов А. А., Кривов А. В., Хайруллин Т. В. Эффективность применения УЗ контроля качества соединений контактной точечной сварки кузовов автомобилей в ОАО АВТОВАЗ // Матер. Всерос. науч.-техн. конф.: Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства, 15–17 ноября 2006. — Тольятти, 2006. — С. 24–27.

33) Исследование и внедрение технологии УЗК качества точечной сварки кузовов автомобилей LADA в ОАО «АВТОВАЗ» / А. В. Новиков, Р. Р. Хакимьянов, В. В. Григорович, А. В. Семеренко // В мире неразруш. контроля. — 2009. — № 2(44). — С. 66–69.

34) Rivas S., Servent R., Belda J. Automated spot weld inspection in the automotive industry [Электрон. ресурс]. — http://www.ndt.net/article/wcndt2004/html/automotive/408_rivas/408_rivas.htm.

35) Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.

36) Martin O., Lopez M., Martin F. Artificial neural networks for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding // J. of Materials Processing Technology. — 2007. — 183, № 2-3. — P. 226–233.

37) Пат. США 7516022B2; МПК8 G06F 17/40, G06F 19/00, G01B 17/00, G01B 21/32. Method and system for assessing quality of spot welds. / Lee Hsu-

Tung, Maev Roman Gr., Maeva Elena Yu, Titov Serguei. — Заявл. 29.09.06; опубл. 07.04.09. — 27 с.

38) Бигус Г. А., Травкин А. А. Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой // Матер. 17-й Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», 5–9 окт. 2009. — Ялта, 2009. — С. 122–124.

39) Пат. 3824377 США: МПК7 Н 03к 21/34. Acoustic emission spot welding controller / Kenneth R. Notvest. — Заявл. 10.05.72; опубл. 16.07.74 — 9 с.

40) ASTM E751-07. Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Resistance Spot—Welding [Электрон. ресурс] // Annual Book of ASTM Standards. — <http://www.astm.org/Standards/E751.htm>.

41) Kek T., Polajnar I., Grum J. Analysis of AE during resistance spot welding // The 10th Intern. conf. of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering», Sept. 1–3, 2009. — Ljubljana, Slovenia, 2009. — P. 243–250.

42) Chaos analysis of acoustic emission signals in spot welding process / Luo Zhen, Wang Rui, Shan Ping, Dong An // China Welding. — 2009. — 18, № 1. — P. 73–78.

43) Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий: Учеб. для ПТУ. — М.: Высш. шк., 1991. — 271 с.

44) Каневский И. Н., Сальникова Е. Н. Неразрушающие методы контроля: Уч. пос. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. — 243 с.

45) Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами. — Челябинск: ЦНТИ, 2000. — 227 с.

46) ГОСТ 15878-79 Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры – Введ. 1980-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 9 с.

- 47) Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие / Под ред. В.В. Смирнова. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с..
- 48) Патон, Б.Е. Электрооборудование для контактной сварки / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев. – М. : Машиностроение, 1969. – 440 с.
- 49) Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В.К. Лебедева, В.П. Черныша. – К. : Вища школа. – 1986. – 296 с..
- 50) Dorn, L. Influence of the mechanical properties of resistance welding machines on the quality of spot welding / L. Dorn, P. Xu // *Schweißen und Schneiden*. – 1993. – № 1. – S. E2–E14.
- 51) Tang, H. Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality / Tang, H., Hou, W., Hu, S. J., [et al.] // *Weld. J.* – 2003. – № 82(5). – P. 116–124.
- 52) Климов, А.С. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки: учебное пособие / А.С. Климов, И.В. Смирнов, А.В. Кудинов, Г.Э. Кудинова // Тольятти: ТГУ, 2008. – 313 с.
- 53) Resistance welding. Weld checkers. Spirit of innovation. Miyachi Uniteck. 991-041 03/07.
- 54) TECNA. Test and measurement instruments. 1000-10/2007.
- 55) Иоффе Ю. Е. Аппаратура управления и контроля для контактной сварки // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: Материалы Третьего междунар. науч.-практ. семинара 13–15 июня 2006 г. — С.-Пб., 2006.
- 56) Подола Н. В., Гавриш В. С., Руденко П. М. Компьютерная диагностика контактной сварки // Автоматическая сварка. – 1994. – № 7/8. – С. 32–35.
- 57) Компьютерная система типа РВК-100 управления машиной для контактной точечной сварки / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. И. Гейц, [и др.] // Автоматическая сварка. – 1991. – № 7. – С. 61–68.

58) Гавриш В. С., Руденко П. М. Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС-02 // Автоматическая сварка. – 2007. – № 11. – С. 43–46.

59) Подола Н. В., Гавриш В. С., Руденко П. М. Система автоматического управления и контроля контактной точечной сварки // Автоматическая сварка. – 2007. – № 9. – С. 54–58.

60) Чакалев, А.А. Саморегулирование процесса контактной сварки / А.А. Чакалев, С.М. Казаков, В.А. Ерофеев // Сварочное производство. – 1986. – № 8. – С. 1–3.

61) Гельман, А.С. Контактная электросварка / А.С. Гельман // М.: Машгиз. – 1949. – 496 с.

62) Высоковский, Е.С. Экспериментальное исследование безотказности электродов точечных контактных машин / Е.С. Высоковский, Л.Ф. Лапинский // Сварочное производство. – 1971. - № 10. – С. 1-3.

63) Николаев А. К., Розенберг В. М. Сплавы для электродов контактной сварки. — М.: Металлургия, 1978. — 95 с.

64) Николаев А. К., Новиков А. Н., Розенберг В. М. Хромовые бронзы. — М.: Металлургия, 1983. — 177 с.

65) Липатов Я. М. Изделия сварочной техники из новых дисперсноупрочненных композитных материалов// Монтаж. и спец. работы в стр-ве. — 1975. — № 4. — С. 11.

66) Данелия Е. П., Розенберг В. М. Внутреннеокисленные сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 231 с.

67) Шалунов Е. П., Равицки Г., Берент В. Я. Высокоресурсные электроды контактной сварки из медных дисперсноупрочненных композиционных материалов: разработка, производство, применение // Междунар. конф. «Электрические контакты и электроды», пос. Кацивели, Крым, 15–21 сент. 2003 г. — Киев: ИПМ им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2003. — С. 89–92.

68) ТУ У 20113410.001–98. Материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов. Технические условия. — Введ. 02.06.98.

69) Структура, механические свойства и термическая стабильность конденсированных дисперсно-упрочненных материалов Cu–Y–Mo. Сообщ. 1 / Б. А. Мовчан, В. А. Осокин, Н. И. Гречанюк, Т. А. Молодкина // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 4. — С. 27–32.

70) Аношин, В.А. Повышение ресурса электродов контактных машин при сварке оцинкованной стали / В.А. Аношин, В.М. Илюшенко, Р.В. Минакова, Н.И. Гречанюк // Автоматическая сварка. — 2010. — № 8. — С. 35–38.

71) Яворский Ю. Д., Зельманович В. Я. Точечная и роликовая сварка малоуглеродистых сталей с защитными покрытиями // Автоматическая сварка. — 1966. — № 6. — С. 59–63.

72) Подола, Н.В. Алгоритмы компенсации износа электродов при контактной точечной сварке / Н.В. Подола, П.М. Руденко, В.С. Гавриш // Автоматическая сварка. — 2005. — № 4. — С. 26–30.

73) Bowers, R.J. Electrode geometry in resistance spot welding / Bowers J.R., Sorensen C.D., Eagar T.W. // Welding Journal. — 1990. — № 2. — P. 45–51.

74) Waddel W. The importance of electrode tip growth when welding zinc coated steels / Waddel W., Williams N.T. // S.l., [1994]. — 8 p. — (Int. Inst. of Welding; Doc. № III–1032–94).

75) Лапинский, Л.Ф. Определение области оптимального регулирования режима контактной точечной сварки при износе электродов / Л.Ф. Лапинский, Е.С. Высоковский, Л.И. Шорина, К.И. Абросимов // Сварочное производство. — 1975. — № 1. — С. 4–6.

76) Регуляторы контактной сварки микропроцессорные РКМ–803УХЛ4 и РКМ–803–1УХЛ4 : паспорт / ЗАО «Электрик–МИКС», С.–Петербург. — 2001. — 36 с.

77) Шереверов, В.И. Серийный микропроцессорный контроллер контактной сварки ККС–01 / В.И. Шереверов, С.А. Бухтин, А.Г. Лившиц // Сварочное производство. – 1988. – № 11. – С. 23–24.

78) Патент № 4104724 США, МПК2 В 23 К 11/24. Digital welder control system / James Allen Dix, Marvin A. Guettel, Michael Aslin; Заявл. 27.06.77; Опубл. 1.08.78.

79) Патент № 5386096 США, МПК6 В 23 К 11/24. Progressive current limit control for a resistance welder / Paul R. Buda, Mark A. Hinton; Заявл. 23.12.93; Опубл. 31.01.95.

80) Патент № 62240180 Япония, МПК4 В 23 К 11/24. Control device for resistance spot welding machine / Suzuki Kanji, Taguchi Kazuhiro; Опубл. 20.10.87.

81) Патент № 5449877 США, МПК6 В 23 К 11/24. Progressive power monitor for current controlled resistance welder / Paul R. Buda, Mark A. Hinton; Заявл. 29.12.93, опубл. 12.09.95.

82) А.с. № 1046051 СССР, МПК3 В 23 К 11/24. Способ управления сварочным током контактной точечной машины / У.У. Ибрагимов, Ф.А. Аксельрод, Ю.Е. Иоффе; Заявл. 15.07.82; Опубл. 07.10.83, Бюл. № 37.

83) Патент № 5436422 США, МПК6 В 23 К 11/25. Resistance welding control method / Toshihiro Nishiwaki, Tatsuo Morita; Заявл. 10.06.94; Опубл. 25.07.95.

84) Ланкин, Ю.Н. Стабилизация сварочного тока контактных точечных машин при колебаниях напряжения питающей сети / Ю.Н. Ланкин, В.Ф. Семикин, Е.Н. Байштрук // Автоматическая сварка. – 2017. – № 5–6. – С. 40-42.

85) А.с. № 1362586 СССР, МПК В23К 11/10, 11/36. Способ контроля сварочного тока / А.А. Чакалев, М.Д. Серегин, К.Н. Тихонов, С.М. Казаков. – Заявл. 04.10.1985; Опубл. 20.12.1987, Бюл. № 48.

86) А.с. СССР № 685460, МПК В23К 11/24. Способ измерения напряжения на электродах сварочной машины / А.А. Урсатьев. – Заявл. 13.04.1978; Оpubл. 15.09.1979, Бюл. № 34.

87) А.с. СССР № 747654, МПК В23К 11/24. Устройство для измерения напряжения на сварочных электродах / А.А. Урсатьев. – Заявл. 26.04.1978; Оpubл. 15.07.1980, Бюл. № 26.

88) А.с. № 1316769 СССР, МПК В23К 11/24. Способ управления сварочным током при контактной сварке и устройство для его осуществления / Эдуард Дзурани, Мартин Янота, Йозеф Кубан. – Заявл. 28.01.80; Оpubл. 15.06.87, Бюл. № 22.

89) А.с. № 912440 СССР, МПК3 В23К 11/24. Устройство для контроля параметров процесса контактной сварки / О.М. Куделко, А.А. Урсатьев, Г.Т. Макаров, А.Д. Попович. – Заявл. 27.06.80; Оpubл. 15.03.82, Бюл. № 10.

90) А.с. СССР № 1299742, МПК В23К 11/24. Способ управления процессом контактной точечной сварки / Н.В. Подола, В.С. Гавриш, П.М. Руденко, И.В. Романюк. – Заявл. 26.07.1985; Оpubл. 30.03.1987, Бюл. № 12.

91) А.с. СССР № 662297, МПК В23К 11/24. Способ регулирования процесса электронагрева при точечной и шовной сварке / А.С. Васильев, А.И. Комарчев, В.П. Стрельников, О.В. Белахов. – Заявл. 26.12.1977; Оpubл. 15.05.1979, Бюл. № 18.

92) А.с. СССР № 1283004, МПК В23К 11/10, 11/24. Способ управления контактной точечной сваркой / Л.Г. Миронов, В.А. Щербаков, В.М. Феногенов, Л.К. Стояков. – Заявл. 17.06.1985; Оpubл. 15.01.1987, Бюл. № 2.