

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)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
оборудования»

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Контроль качества сварки и диагностика
состояния многоэлектродных машин

Студент

Т.В. Киреев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., профессор Г.М. Короткова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

к.т.н., доцент А.С. Климов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание

Введение	4
.	
1 Управление качеством контактной сварки в условиях массового производства	8
..	
1.1 Критерии качества и требования к методикам контроля качества контактной сварки на современном производстве	8
.	
1.2 Описание многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421	20
..	
1.3 Описание многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.651.421	27
..	
1.4 Формулировка задач диссертационного исследования.	31
..	
2 Анализ возмущений контактной сварки	32
.	
2.1 Особенности контактной точечной сварки в массовом производстве	32
..	
2.2 Влияние колебания напряжения сети на качество сварки	32
..	
2.3 Влияние износа электродов на качество сварки.	37
..	

2.4 Влияние стабильности сжатия электродов на качество сварки. . .	38
.	
2.5 Особенности износа элементов вторичного контура многоэлектродных машин	40
..	
2.6 Особенности конструкции элементов вторичного контура	42
..	
2.7 Особенности управления током сварки в условиях износа электродов	42
..	
3 Оперативная диагностика состояния вторичных контуров многоэлектродных контактных машин	50
.	
3.1 Постановка проблемы	50
.	
3.2 Математическое описание способа оперативной оценки состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин	52
.	
3.3 Вычисление коэффициентов регулирования и мощности.	57
.	
3.4 Вычисление регулировочной характеристики $k_r \cos \varphi$	60
.	
3.5 Методика оценки состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин.	62
..	
Заключение	68
.	

Список используемой литературы и используемых источников 70

..

Введение

Возможность практически полной автоматизации основных и вспомогательных процессов, возможность роботизации и высокая производительность определяют широкое распространение контактной сварки в массовом производстве. В частности, кузов легкового автомобиля насчитывает несколько тысяч сварных точек, а всего в мире ежегодно выполняется десятки миллиардов сварных точек.

Основным условием формирования соединения при контактной точечной сварке является образование сварного ядра с заданными геометрическими размерами. Чтобы при контактной сварке получить соединение надлежащего качества, следует добиться образования зоны взаимного расплавления, которая должна быть общей для свариваемых деталей [15], [17], [30], [62]. Размеры получаемой зоны (ядра сварной точки) должны соответствовать заданным согласно ГОСТ 15878-79. В этом случае обеспечивается достаточная прочность соединения.

Наблюдаемый в настоящее время мировой финансовый кризис является системным и начинает перерастать в экономический кризис, что сопровождается дальнейшим обнищанием населения и снижением его покупательной способности. Так же необходимо учесть девальвацию рубля как национальной валюты, что делает сверхдорогими импортные товары. Вот почему первоочередной задачей является «задача замещения», которая предусматривает замещение дорогих товаров их отечественными аналогами.

Усовершенствование технологии сварки деталей в массовом производстве, таком как автомобильная промышленность всегда актуально. Снижение себестоимости автомобиля и трудоемкости его изготовления складываются из соответствующего снижения себестоимости и трудоемкости изготовления его частей. Поэтому необходимо добиваться максимального уменьшения затрат на изготовление каждой детали, каждого узла автомобиля с одновременным сохранением и улучшением качества и условий труда, что

ведет к увеличению конкурентоспособности готового изделия на внутреннем и внешнем рынках и приносит прибыль предприятию.

Быстрое изменение конструкции свариваемого изделия (а иногда и пробные выпуски), присущие современному автомобилестроению, требуют обеспечения достаточной гибкости производства, позволяющей в максимально сжатые сроки обеспечивать изготовление новой продукции без доработки основных компонентов таких систем. Наиболее оптимальным с этой точки зрения является использование ручного труда сварщика, что обеспечивает возможность быстрой перенастройки на выпуск новых деталей. Однако резкое подорожание ручного труда, его малая производительность, а так же связанные с ним социальные обязательства перед работниками, делают такой способ производства экономически неэффективным по сравнению с другими способами производства. Поэтому весьма актуальным является повышение эффективности именно автоматизированных процессов контактной сварки.

На стабильность формирования ядра сварной точки и качество соединения оказывает влияние множество факторов [26], [36], [67], [71]: колебание напряжения питающей сети (изменение сетевого напряжения, первичного и вторичного напряжения), изменение параметров вторичного контура (индуктивного сопротивления – действие ферромагнитных масс, активного сопротивления – износ и нагрев элементов вторичного контура из-за процесса интенсивной работы), шунтирование сварочного тока (протекание части вторичного тока не через сварную точку, а через ранее сваренные точки, приспособление или детали), изменение свойств свариваемых деталей (колеблется толщина проката, толщина и состав защитного покрытия, загрязнение поверхности деталей), износ сварочных электродов (увеличивает теплоотвод в сварочные электроды и уменьшает плотность сварочного тока из-за роста площади рабочего торца электрода).

Программное управление контактной сваркой предусматривает выбор оптимальных параметров режима и их поддержание в течение рабочей смены.

При этом правильность выбора параметров режима должна обеспечивать стабильное качество сварки в условиях нахождения возмущений в некоторых пределах. Выбор параметров контактной сварки должен быть основан на достижениях в области моделирования тепловых, деформационных и электрических процессов, которое позволяет прогнозировать качество сварки и задавать оптимальные параметры режима для заданных начальных условий [9], [34], [35], [47], [54], [55], [58], [66], [70], [72], [73].

Получение качественных соединений при сварке в условиях возмущений достигается применением автоматических регуляторов, которые не только реализуют функции программного задания параметров режима (в число которых чаще всего входят – количество импульсов сварочного тока и их длительность, величина тока в каждом импульсе, сварочное усилие, различные временные параметры), но и позволяют компенсировать некоторые возмущения. Разработкой аппаратуры управления контактной сваркой занимаются известные отечественные и зарубежные производители: ОАО «Фирма СЭЛМА» (Россия), ЗАО «Псковэлектросвар» (Россия), ЗАО «Электрик–МИКС» (Россия), «ENTRON Controls» (США), «Welding Technology Corporation» (США), «Bosch Rexroth» (Германия), «Dengensha» (Япония), «Spotron» (Япония). Этими фирмами достигнут существенный прогресс в области повышения стабильности качества контактной сварки при различных возмущениях, однако величина и характер возмущений, присущие массовому производству (повышенный износ сварочных электродов, значительные колебания напряжения питающей сети, шунтирование сварочного тока, низкая стабильность сварочного усилия) не позволяют в полной мере устранить их влияние на качество сварки [31], [32], [64].

Одним из возмущений, которое может существенно повлиять на стабильность контактной сварки, является износ оборудования. В частности, из-за интенсивной работы происходит износ гибких токоподводов многоэлектродных и подвесных сварочных машин, который приводит к увеличению активного сопротивления вторичного контура и снижению

сварочного тока, может стать причиной получения брака (непровара и пропуска сварной точки). Также в ходе интенсивной сварки в течение рабочей смены происходит износ сварочного электрода, увеличение его рабочей поверхности, что приводит к увеличению оттока тепла в электроды от сварной точки и снижению плотности тока, это тоже является причиной появления непроваров. Современная аппаратура управления не позволяет оценить и компенсировать эти возмущения.

Рост возможностей аппаратуры управления по компенсации возмущений возможен благодаря синтезу новых алгоритмов управления, которые основаны на взаимосвязи тепловых процессов в зоне сварки и электрических процессов в сварочном оборудовании. Полученные закономерности позволяют не только повысить стабильность качества сварки в условиях возмущений, но и прогнозировать уменьшение числа параметров обратной связи [3], [8], [23], [25], [27], [40], [68]. Применение в качестве параметра обратной связи длительности включенного состояния тиристорov позволяет также повысить помехозащищённость способов управления и существенно упростить аппаратную часть [24], [25], [29].

Актуальна **цель** диссертационного исследования – повышение стабильности качества контактной сварки путём разработки методик диагностики состояния многоэлектродных машин и синтеза новых алгоритмов управления.

Объектом диссертационного исследования является качество контактной точечной сварки и влияние на него различных возмущений в условиях массового производства.

Предметом диссертационного исследования являются электрические процессы в многоэлектродных сварочных машинах при интенсивной работе в условиях массового производства.

1 Управление качеством контактной сварки в условиях массового производства

1.1 Критерии качества и требования к методикам контроля качества контактной сварки на современном производстве

Современное производство с применением контактной сварки характеризуется наличием различных возмущений, которые не удаётся полностью устранить, в результате чего эти возмущения оказывают существенное влияние на стабильность формирования сварного соединения и качество сварки в целом. Процесс контактной сварки с точки зрения компенсации возмущений может быть разложен на несколько потоков, из которых входными являются показанные на рисунке 1:

- факторы, влияющие на образование ядра сварной точки;
- работники, участвующие в проектировании и изготовлении кузова автомобиля;
- нормативная документация, регламентирующая требования последовательность действий, количественные и качественные характеристики каждого этапа процесса.

Отбор деталей и узлов на контроль производится при отработке новой технологии сварки, в начале каждой смены, после ремонта и наладки технологического оборудования. Также в течение смены, руководствуясь внешними признаками и случайной выборкой, выполняют отбор деталей и узлов на выборочный контроль.

Качество контактной сварки обеспечивается согласно рисунка 2 визуальным-измерительным контролем сварных точек, расщеплением, разрушающим контролем (с использованием молотка и зубила), испытанием на срез, макрографическим анализом, ультразвуковым контролем, разработкой и поддержанием параметров режима сварки, текущим контролем сварочного оборудования.

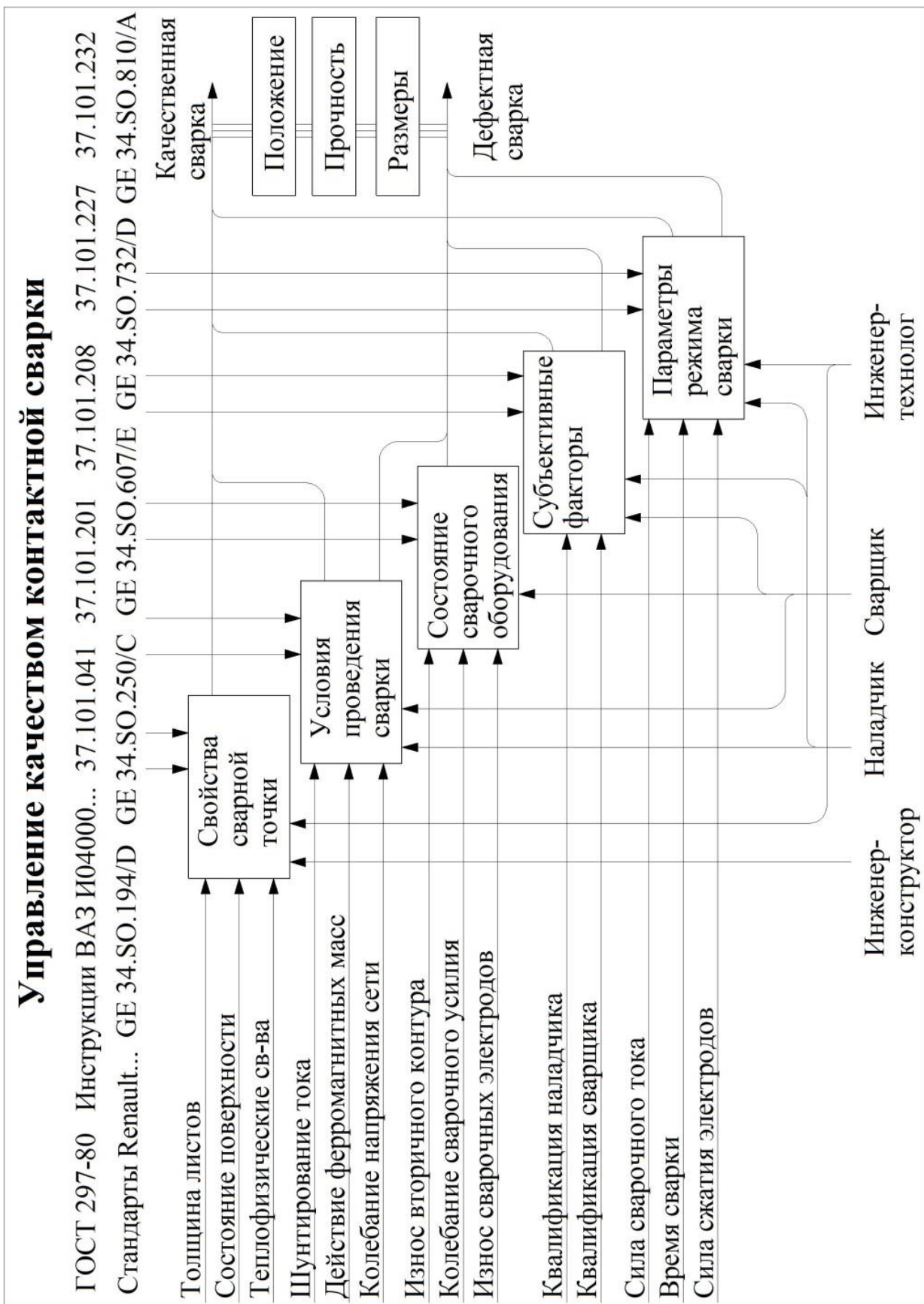


Рисунок 1 - Управление качеством контактной сварки (взаимодействие субъектов процесса управления)

Управление качеством контактной сварки

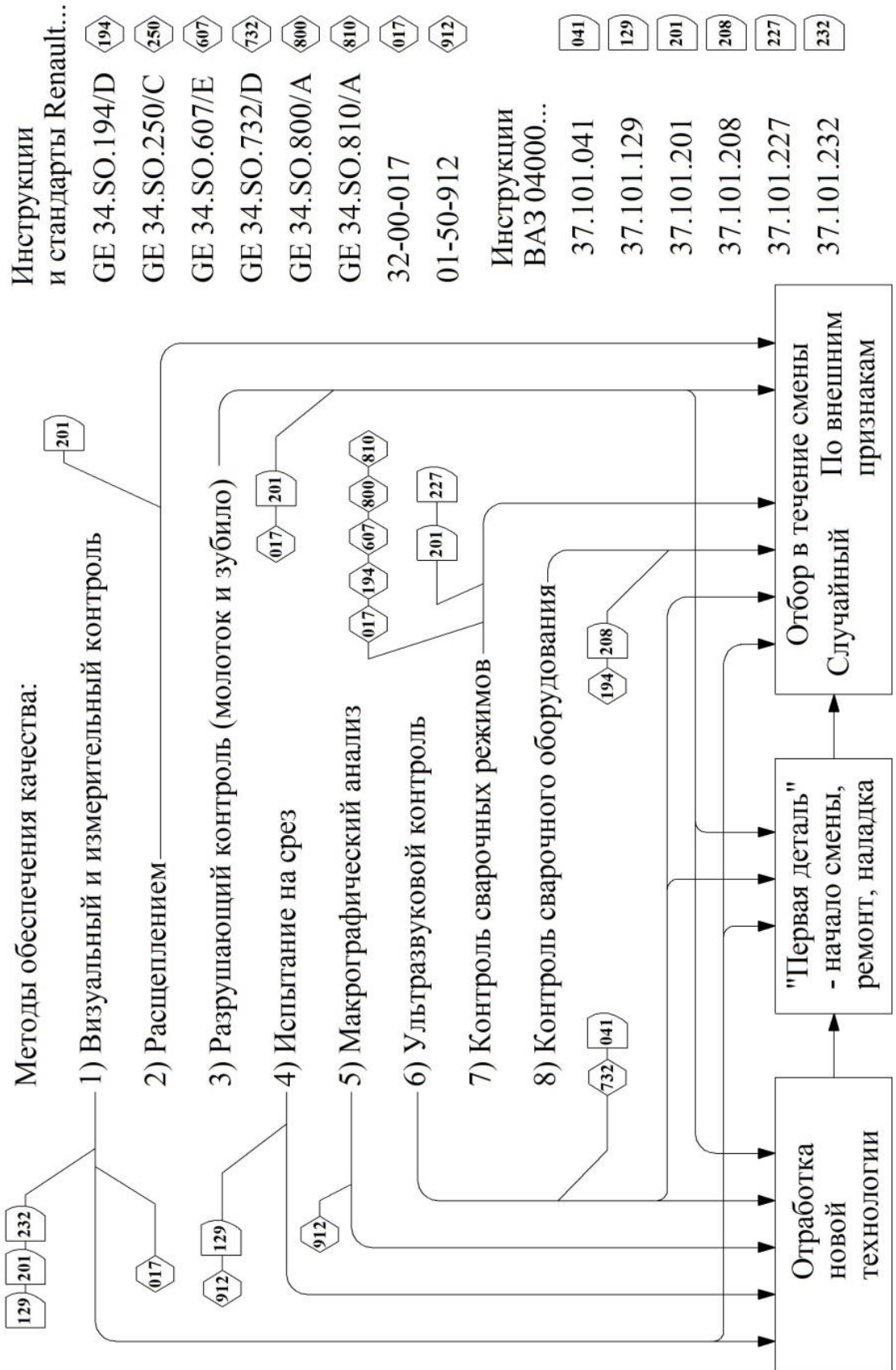


Рисунок 2 – Управление качеством контактной сварки (методы и нормативная документация)

На рисунке 3 показаны критерии качества контактной точечной сварки:

- положение сварной точки,
- прочность сварной точки,
- размеры сварной точки,
- отсутствие недопустимых дефектов.

Положение каждой сварной точки на изделии регламентируется конструкторским чертежом сварного узла. Также нормативной документацией регламентируется величина нахлестки и шаг сварных точек, а также расстояние между сварной точкой и краями изделия.

Прочность сварного соединения оценивается по величине разрушающего усилия на срез и осуществляется при отработке технологии сварки.

Приблизительная оценка размеров сварной точки выполняется расщеплением и ультразвуковым контролем. Определение точных значений диаметра ядра сварной точки происходит при разрушающем контроле.

Контроль качества контактной точечной сварки включает в себя:

- визуальный контроль сварных соединений;
- инструментальный контроль сварных соединений;
- контроль качества сварных соединений.

Визуальный контроль качества сварных соединений заключается в оценке качества точек сварки по внешнему виду. Не допускается на поверхностях I и II класса наличие выплесков, прожогов, вмятин (кроме отпечаткой электродов глубиной не более 20 % толщины металла), трещин, пропусков (отсутствие) точек контактной сварки, на поверхностях III и IV класса наличие сквозных прожогов, уменьшающих прочность соединения и влияющих на герметичность.

Инструментальный контроль сварных соединений заключается в измерении геометрических параметров сварных соединений и элементов точек сварного шва.

Критерии качества контактной сварки

1. Положение сварной точки 017
2. Размеры сварной точки 129
3. Прочность сварной точки 232
4. Отсутствие недопустимых дефектов (прожог, пропуск точки, искривление детали, трещины, выплеск, слипание) 201

912

129

Толщина металла, мм	Мин. диаметр ядра, мм	Макс. глубина вмятины, мм
0,6...0,8	3,5	20% от толщины металла
0,8...1,0	4,0	
1,0...1,3	5,0	
1,3...1,6	6,0	

Толщина металла, мм	Мин. нахлёстка, мм	Мин. расстояние до края, мм	Мин. шаг точек, мм
0,6...0,8	10,0	5,0	13,0
0,8...1,0	11,0	5,5	15,0
1,0...1,3	13,0	6,5	17,0
1,3...1,6	14,0	7,0	20,0

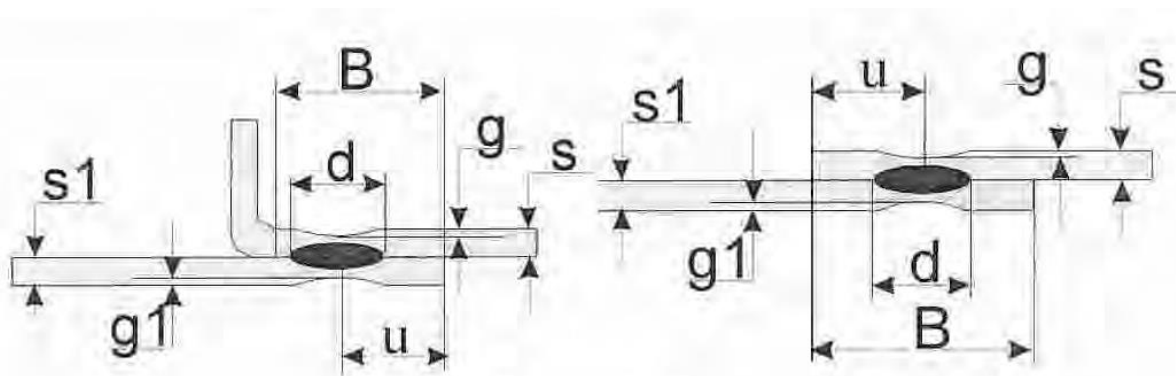
Минимальное разрушающее усилие на сварную точку при статическом срезе

Толщина тонкой детали, мм	σ_B основного металла, МПа		
	$\sigma_B < 500$	$500 < \sigma_B < 600$	$600 < \sigma_B < 700$
0,8	273	345	395
1,0	385	485	555
1,2	525	655	750
1,5	760	950	1100

Стандарты Renault...	Инструкции ВАЗ 04000...	
32-00-017	37.101.129	129
01-50-912	37.101.201	201
	37.101.232	232

Рисунок 3 – Критерии качества контактной сварки

Конструктивные элементы сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой согласно ГОСТ 15878 приведены на рисунке 4 и в таблице 1.



s и s1 – толщина свариваемого металла; d – диаметр ядра сварной точки; g и g1 – глубина вмятины от сварочного электрода; B – величина нахлестки; u – расстояние сварной точки от края изделия

Рисунок 4 – Конструктивные элементы сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой

Таблица 1 – Размеры конструктивных элементов соединения, выполненного контактной точечной сваркой

Толщина металла «s-s1»	Диаметр ядра d, не менее	Величина нахлестки B, не менее	Расстояние до края u, не менее	Шаг точек t, не менее
Св. 0,4 до 0,6	3,0	8,0	4,0	10,0
Св. 0,6 до 0,8	3,5	10,0	5,0	13,0
Св. 0,8 до 1,0	4,0	11,0	5,5	15,0
Св. 1,0 до 1,3	5,0	13,0	6,5	17,0
Св. 1,3 до 1,6	6,0	14,0	7,0	20,0
Св. 1,6 до 1,8	6,5	15,0	7,5	22,0
Св. 1,8 до 2,2	7,0	17,0	8,5	25,0
Св. 2,2 до 2,7	8,0	19,0	9,5	30,0
Св. 2,7 до 3,2	9,0	21,0	10,5	35,0
Св. 3,2 до 3,7	10,5	24,0	12,0	40,0
Св. 3,7 до 4,2	12,0	28,0	14,0	45,0

Измерение конструктивных элементов и параметров сварных швов выполняется универсальным мерительным инструментом (штангенциркулем ШЦ-1 ГОСТ 166 или линейкой ГОСТ 427). Измеренные значения должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 1.

Глубина вмятины при контактной точечной сварке (g, g_1) с каждой стороны узла не должна превышать 20% от толщины детали. Допускается при сварке узлов с отношением толщин деталей $s/s_1 > 2$, в случае применения одного из электродов с увеличенной плоской рабочей поверхностью, а также при сварке в труднодоступных местах увеличение глубины вмятины до 30% толщины детали.

Для всех сварных узлов расположение, количество, шаг точек и длины швов должны соответствовать конструкторской и технологической документации. Величина шага точек сварки на узлах и кузове определяется конструктивными особенностями технологического оборудования и свариваемого узла.

Координаты расположения точек сварки определяются конструктивными особенностями свариваемого узла, исходя из требований обеспечения прочности изделия.

При соблюдении условия равномерности расположения точек в сварном шве, шаг (расстояние между точками) при заданных толщинах не должен быть менее величины, указанной в таблице 1 с целью исключения шунтирования.

Неравномерность шага точек сварного шва определяется соотношением величин наибольшего (t_{\max}) и наименьшего (t_{\min}) расстояний между точками и рассчитывается согласно

$$t_{\max} \leq 1,5 t_{\min}. \quad (1)$$

Так, например, если в сварном шве наименьший шаг точек $t_{\min} = 30$ мм, наибольший шаг точек $t_{\max} = 45$ мм, как на рисунке 5-а, то такой шов согласно (1) может быть признан допустимым по неравномерности шага точек.

Если же в сварном шве при наименьшем шаге точек $t_{\min} = 30$ мм наибольший шаг составляет $t_{\max} = 60$ мм, как на рисунке 5-б, то такой шов согласно (1) следует признать дефектным.

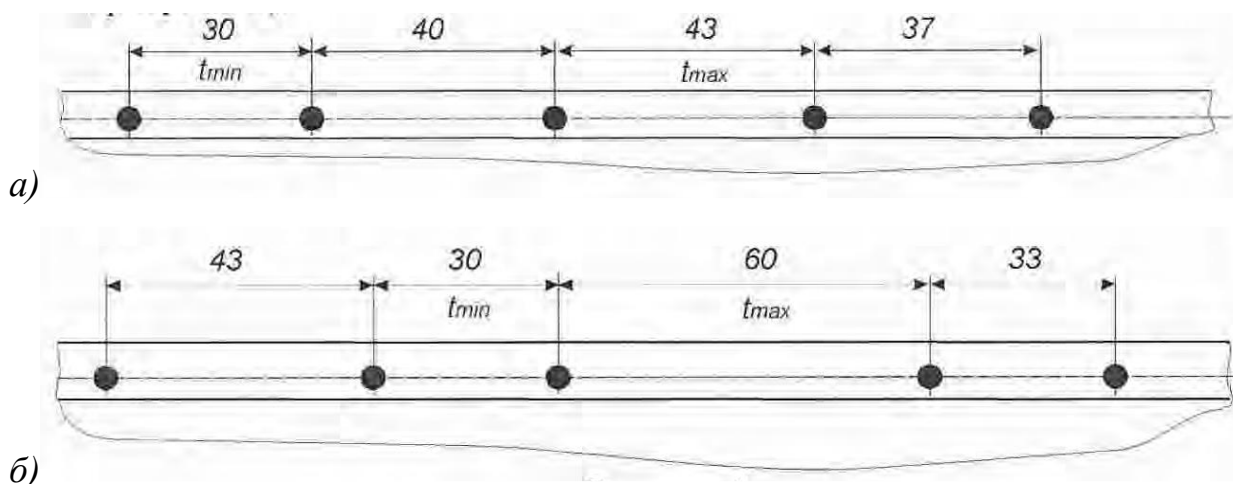


Рисунок 5 – Сварной узел с допустимой (а) и недопустимой (б) неравномерностью шага точек

В случае сварки деталей с соотношением толщин $s/s_1 > 2$, минимальные величины нахлестки B и шаг между точками t следует увеличивать в 1,2...1,3 раза.

Если при сварке деталей на стационарных сварочных машинах, подвесных сварочных машинах расположение сварной точки имеет отклонение от требований ГОСТ 15878 или конструкторской документации относительно края фланца, то такая точка считается нестандартной. Допускается постановка дополнительной сварной точки с последующей проверкой ее качества.

Контроль качества сварных соединений узла выполняется тремя методами:

- контроль точек сварки с применением УЗП,
- контроль точек сварки методом расщепления,
- контроль точек сварки разрушающим методом.

Контроль качества точечной сварки УЗП выполняется контролерами СККСиО в цехах сварки в соответствии с технологией контроля и действующими инструкциями.

Выборочный контроль точек сварки методом расщепления выполняется рабочими и контролерами на готовых узлах выборочно для проверки сомнительных точек после контроля УЗП или в случае отсутствия УЗП. Для

выявления непроваров зубило забивается между точками сварки. Точки сварки считаются годными, если при испытании явно выражено вытягивание металла, имеющее отчетливые границы правильного круглого литого ядра.

После выполнения контроля точек сварки рабочий или контролер устраняют деформацию деталей и при необходимости направляют узел в зону ремонта для устранения дефектов или повреждений узла.

Контроль точек сварки разрушающим методом выполняется контролерами на готовых изделиях до полного разрушения сварных соединений с применением молотка и зубила. Периодичность разрушающего контроля указывается в технологии контроля контролируемого узла.

При контроле точечной сварки разрушающим методом для деталей с толщиной листа менее 1,5 мм, когда разрушение происходит с образованием зоны вырыва и отверстия, за диаметр ядра принимается диаметр зоны вырыва d , показанный на рисунке 6.

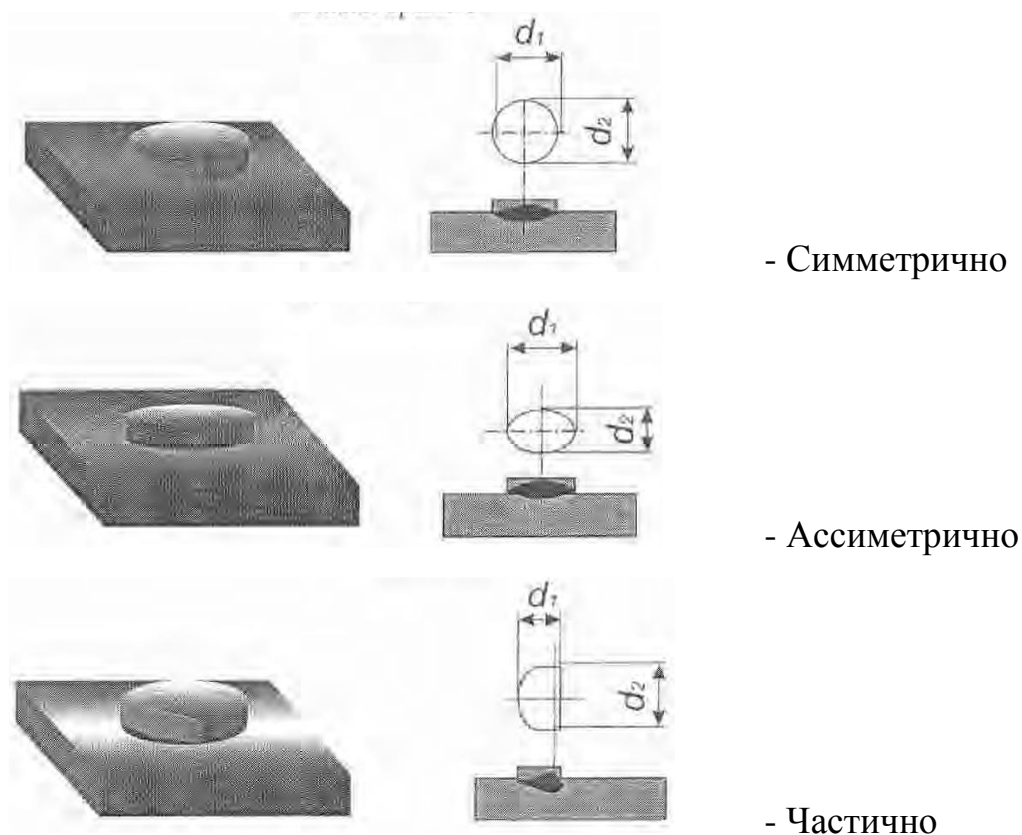


Рисунок 6 – Сварная точка с разрушением и вырывом

При контроле точечной сварки для деталей с толщиной листа более 1,5 мм, когда разрушение происходит по ядру сварной точки с обязательно явно выраженным вытягиванием и прославлением металла, за диаметр ядра принимается диаметр зоны, имеющей отчетливые круглые границы правильного круглого литого ядра.

Диаметр зоны вырыва (среза) d литого ядра сварной точки после разрушения определяется как среднее значение двух измерений в перпендикулярных сечениях по плоскости разрушения. Для измерения используется штангенциркуль ШЦ-1 ГОСТ 166 или линейка ГОСТ 427.

При асимметричной или неправильной форме зоны вырыва (среза) за диаметр принимается среднее значение двух измерений по минимальному и максимальному размерам диаметра зоны вырыва (среза).

Увеличение диаметра литого ядра точки сварки более, чем в 1,5 раза не является браковочным признаком, если это не приводит к ухудшению качества внешнего вида узла, деформации кромок и прочим дефектам.

При сварке деталей разной толщины металла значение диаметра литого ядра принимается по детали меньшей толщины.

При сварке трех и более деталей, величину литого ядра следует устанавливать по наименьшей толщине детали, находящейся в соприкосновении с электродами. Допускается сквозное проплавление деталей, находящихся внутри свариваемого пакета.

Контроль качества сварки закрытых сечений кузова и труднодоступных зон выполняется на образцах, вырезанных из узлов. Количество образцов не должно превышать норматива расхода деталей на разрушающий контроль.

После завершения испытаний методом разрушения и при отсутствии возможности восстановления деталей после контроля методом расщепления, узлы списывают в окончательный брак.

Оценка прочности соединения при контактной точечной сварке выполняется путём измерения разрушающего усилия на срез, как показана на рисунке 7, рисунке 8 и рисунке 9 [17], [18], [53]. Минимально допустимое разрушающее усилие на срез устанавливается на 15...25 % ниже средних показателей прочности, при этом сварное соединение может быть признанным качественным, если при разрушении на срез образцов разрушающее усилие было не меньше этого допустимого значения.

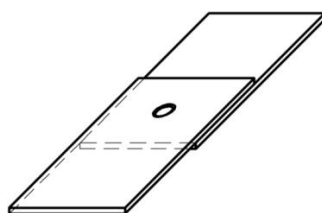


Рисунок 7 – Схема расположения пластин при контактной сварке образцов внахлест

Таблица 2 – Минимальное разрушающее усилие на одну сварную точку при статическом срезе [59]

Толщина тонкой детали, мм	σ_B основного металла, МПа		
	$\sigma_B < 500$ МПа	$500 < \sigma_B < 600$ МПа	$600 < \sigma_B < 700$ МПа
0,8	273	345	395
1,0	385	485	555
1,2	525	655	750
1,5	760	950	1100

Таблица 3 - Минимальное разрушающее усилие на одну сварную точку при статическом срезе [53]

Толщина тонкой детали, мм	σ_B основного металла, МПа			
	$\sigma_B < 370$ МПа	$370 < \sigma_B < 590$ МПа	$590 < \sigma_B < 780$ МПа	$\sigma_B > 780$ МПа
0,8	310	370	530	690
1,0	390	460	590	770
1,2	470	550	640	840
1,5	880	1040	1620	2120
2,0	1180	1380	1870	2440
2,5	1960	2300	3720	4860
3,0	2350	2760	4080	5320
3,5	3090	3620	5580	7270
4,0	3530	4140	5960	7780

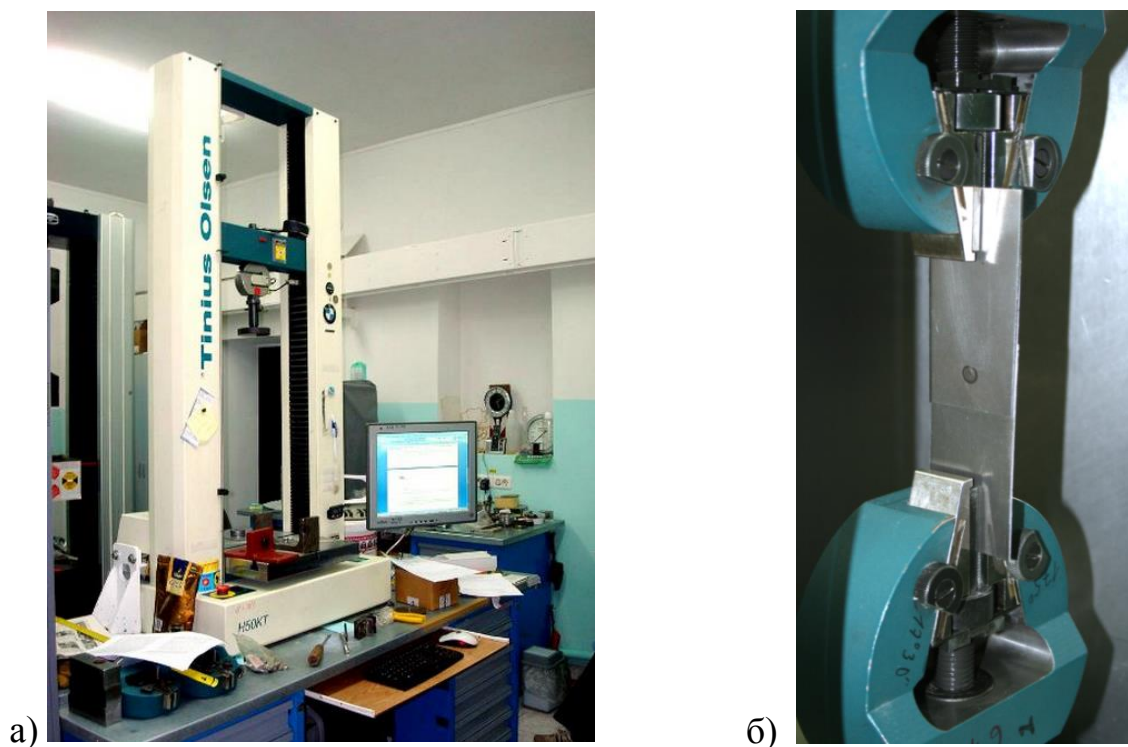


Рисунок 8 – Проведение механических испытаний: а – разрывная машина H50KT (Tinius Olsen, Ltd., Великобритания) на которой проводились испытания, б – установка образца контактной сварки в захваты разрывной машины



Рисунок 9 – Вырыв литой зоны на примере одного из испытанных образцов контактной точечной сварки

Минимальные разрушающие усилия на одну сварную точку установлены практикой и приведены в большом количестве учебной, научной и нормативной литературы [51], [53], [59], [60].

1.2 Описание многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421

Многоэлектродная сварочная машина МСМ 503.618.421 установлена на Сборочно-кузовном производстве, цех 1421, где происходит сварка кузовов автомобилей на платформе Kalina.

Назначение многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421 – сварка усилителя внутренней панели задней двери правого в сборе – деталь 1118-6201080, показанная на рисунке 10. Эта деталь используется при производстве дверей автомобилей Granta FL (ВАЗ-2190 - седан / 2191 - лифтбек / 2192 - хэтчбек / 2194 - универсал) и Datsun (ВАЗ-2195 – седан / 2197 - хэтчбек).

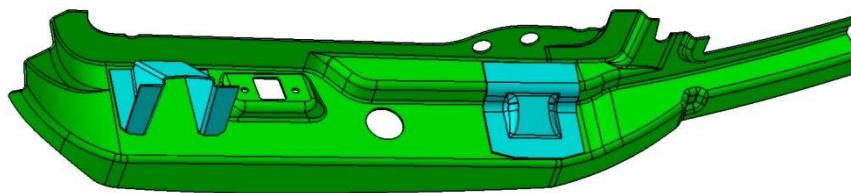


Рисунок 10 – Усилитель внутренней панели задней двери правый в сборе
1118-6201080

Сам изготавливаемый узел состоит из усилителя внутренней панели задней двери под петли 1118-6201184 (толщиной 1,8 мм), к которому привариваются контактной точеной сваркой распорка усилителя под петли задней двери верхняя 1118-6201206 (толщиной 1,5 мм) - в восьми точках и распорка усилителя под петли задней двери нижняя 1118-6201208 (толщиной 1,5 мм) – в шести точках согласно рисунку 11. Все свариваемые детали изготавливаются из стали 08Ю (согласно ТУ 14-4-1207-82).

МСМ состоит из С-образного пресса 1, представленного на рисунке 12, на котором смонтирован каркас 2, представляющий собой две плиты две плиты, скрепленных стойками и служащими для сборки нижней 6 и верхних 7, 8 сварочных оснасток.

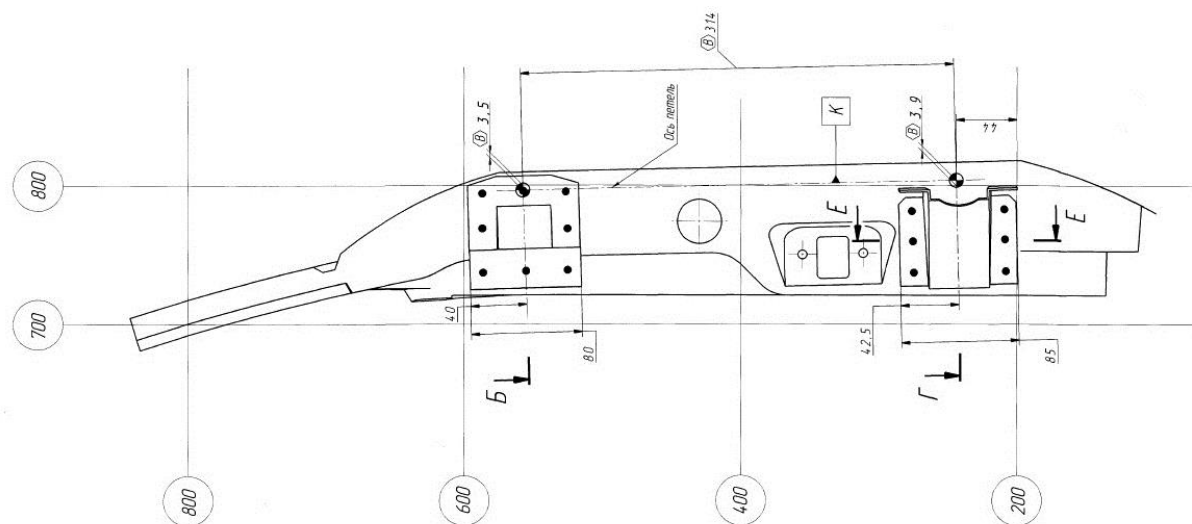
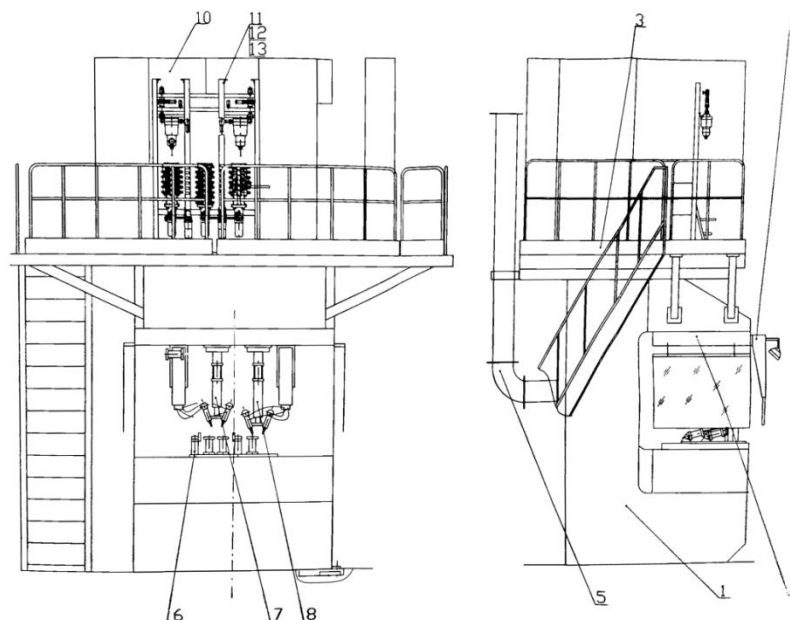


Рисунок 11 – Расположение сварных точек при приварке распорок к усилителю на детали 1118-6201080



1 – пресс С-образный; 2 – каркас; 3 – антресоль; 4 – защитный экран; 5 – система отсоса; 6 – нижняя сварочная оснастка; 7 и 8 – верхняя сварочная оснастка; 10 – силовой шкаф; 11 – система охлаждения; 12 – система смазки; 13 – пневмопанель

Рисунок 12 – Компонентная схема многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421

Антресоль 3 представляет собой сварной каркас, на котором установлены шкафы электрооборудования и пневмопанели. Защитный экран 4 состоит из направляющих, в которых перемещается прозрачный экран, связанный с помощью двух цепей через звездочки со столом пресса. При подъеме стола

пресса экран совершает ход вниз на 400 мм, при опускании стола – поднимается вверх. Система отсоса 5 представляет собой сборочный узел, состоящий из трубопроводов и воздухозаборника. Система предназначена для удаления сварочного аэрозоля из зоны сварки. Установка и фиксация свариваемой детали выполняется на нижней оснастке 6. Группы сварки 7 и 8 представляют собой кронштейны с крепящимися на них каретками со сварочными клещами.

Техническая характеристика многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421 представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Техническая характеристика многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421

Тип машины – многоточечная сварочная на базе С-образного пресса	712300321006-20 (обозначение пресса)
Производительность при $K_{исп}$ 90%, дет./час	90
Количество операторов, чел.	1
Количество точек сварки, шт.	14
Количество и тип сварочных трансформаторов, шт.	2, ТК 401У4
Мощность, кВА	100
Напряжение питания, В, Гц	380; 50
Привод пресса Электродвигатель привода мощность, кВт частота вращения, 1/мин	электромеханический АИР132S6У3 5,5 960
Привод сварочной оснастки Давление, Мпа - в сети сварочных клещей - в сети остальной оснастки Расход, м ³ /сек, max - в сети сварочных клещей - в сети остальной оснастки	пневматический 0,75...1,0 0,4...0,6 0,02 0,01
Охлаждение Давление, Мпа Расход, м ³ /сек, max Температура, °С	водяное 0,2...0,45 0,0004 18...20
Система смазки	автоматическая
Количество отсасываемого воздуха, м ³ /сек	0,225
Масса, кг	17600
Габариты, мм - длина - ширина - высота	 5100 3750 5840

Многоточечная сварочная машина работает следующим образом. Оператор вручную загружает детали в нижнюю оснастку 6, как показана на рисунке 13. После окончания загрузки оператор нажимает на кнопки двуручного пульта управления. На нижней оснастке срабатывают пневматические прижимы, после чего подается команда на подъем стола прессы 1. После подъема стола прессы подвигаются клещи и производится сварка. После окончания сварки клещи отводятся в исходное положение, стол прессы опускается, прижимы раскрываются и сваренная деталь выталкивается из ложементов оснастки. Оператор вручную снимает готовую деталь и укладывает ее в тару.

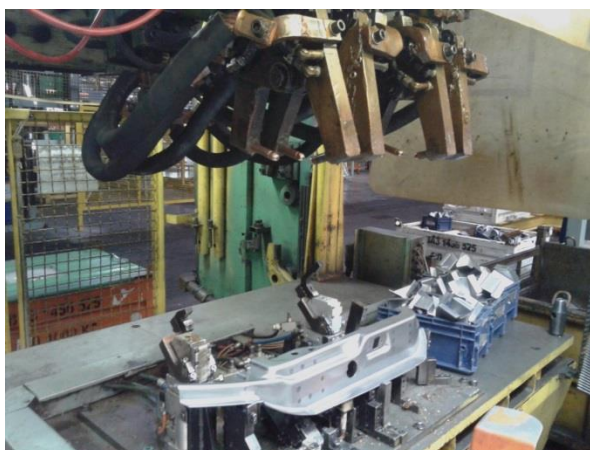


Рисунок 13 – Сварочная оснастка многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.618.421

В состав электрооборудования 10, согласно рисунка 12, сварочной машины входят: шкаф главного выключателя; шкаф сварки; шкаф электроаппаратуры; шкаф контроллера; коробка с модульным блоком Flex I/O; пульт управления; пульт оператора двуручный; пост «Аварийный стоп»; шкаф освещения ШО; пост «Освещение»; электродвигатель стола; 2 сварочных трансформатора по 100 кВА каждый; реле протока воды, реле давления, бесконтактные и контактные конечные выключатели, электромагниты пневмораспределителей; клеммные коробки, коробка и арматура для прокладки кабелей.

В машине использованы следующие уровни напряжения:

- постоянный ток 24 В - питание электромагнитов пневмораспределителей, бесконтактных конечных выключателей, катушек реле, входных и выходных цепей контроллера, блоков питания Flex;

- переменный ток 24 В - питание блокировок дверей шкафов, переносных ламп;

- переменный ток 220 В - блок питания контроллера, лампы освещения;

- переменный ток 380 В - цепи сварки, электродвигатели стола.

Система охлаждения 11, показанная на рисунке 12, предназначена для отвода тепла от нагруженных токоведущих частей вторичного контура машины. Охлаждению подвергаются сварочные трансформаторы и клещи. Охлаждение осуществляется рекуперационной водой давлением до 0,4 МПа (4 кгс/см²). На входном трубопроводе установлен фильтр для очистки воды от механических примесей. Давление на входе контролируется манометром. На выходном трубопроводе установлен расходомер для визуального контроля расхода охлаждающей воды. Контроль расхода охлаждающей воды осуществляет реле протока, установленное на выходном трубопроводе.

Подвод воды к охлаждаемым элементам и ее отвод осуществляется параллельным способом (или параллельно-последовательным) с помощью гибких резиновых рукавов. Подводящие и отводящие коллекторы, арматура с малыми сечениями выполнены из цветного металла с целью исключения зарастания отверстий.

Для очистки систем охлаждения от механических примесей и химических отложений предусмотрена продувка сжатым воздухом, куда входят запорный вентиль и редуционный пневмоклапан, а коллекторы выполнены разборными.

Система смазки 12, представленная на рисунке 12, предназначена для автоматической дозированной подачи смазочного материала к трущимся парам. Система смазки одномагистральная, периодического действия, на

последовательных питателях. Система смазки состоит из системы смазки сварочного пресса, питателей и соединительных трубопроводов.

Окончание циклов густой и жидкой смазки контролируется микропереключателями, наличие смазочного материала контролируется датчиками уровня, установленными в баках станций густой и жидкой смазки.

Номинальное давление в системе 10 МПа (100 кгс/см²) при давлении воздуха 0,63 МПа (6,3 кгс/см²). Максимальное давление срабатывания предохранительного устройства – 12,5 МПа (125 кгс/см²).

Пневмосистема 13, представленная на рисунке 12, машины для привода прижимов, стопоров, механизмов перемещения, клещей, кареток, для подвода воздуха к пневмосистеме пресса. Имеется отвод воздуха для пневмоинструмента.

В состав пневмосистемы входит пневмопанель со смонтированной на ней контрольно-распределительной аппаратурой, исполнительные цилиндры, соединительные трубопроводы.

Сжатый воздух из цеховой сети через блок подготовки воздуха, управляющую и распределительную аппаратуру поступает к исполнительным цилиндрам и отводам.

Редукционными клапанами устанавливаются необходимые давления в цилиндрах привода прижимов, сварочных пистолетов, клещей. Редукционный клапан устанавливает необходимое давление на подводе к пневмоинструменту.

Контроль давления в системе производится по реле давления ОРД.01 (цеховая сеть P=0,63 Мпа) и ОРД.02 (цеховая сеть P=1 МПа).

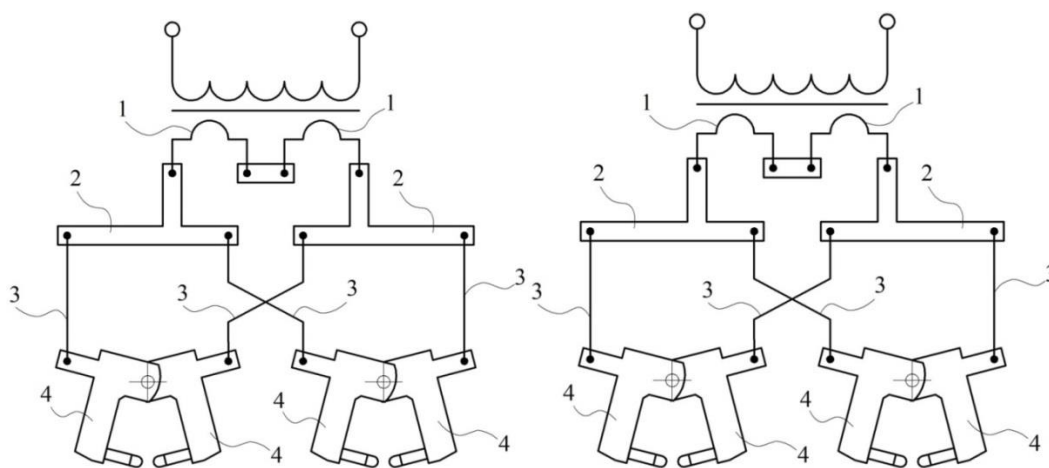
Дроссели с обратными клапанами предназначены для регулирования скоростей движения штоков исполнительных цилиндров.

Фильтры-влагоотделители и водоотделители предназначены для очистки сжатого воздуха от воды и механических примесей.

Глушители предназначены для снижения уровня шума при выхлопе сжатого воздуха в атмосферу. Фильтры-глушители служат для выброса в атмосферу очищенного от масла воздуха.

Пневмораспределители ручные предназначены для быстрого отключения подачи сжатого воздуха и одновременного соединения пневмосистемы сварочной машины с атмосферой.

Работа всех пневмоцилиндров обеспечивается пневмораспределителями с электропневматическим управлением.



1 – вторичный виток сварочного трансформатора; 2 – токоведущая жёсткая шина; 3 – гибкий токоподвод; 4 – сварочные клещи

Рисунок 14. Схема вторичного контура сварочной группы машины MCM 503.618.421

Таблица 5 – Параметры режима сварки усилителя внутренней панели задней двери 1118-6201080 на машине MCM 503.618.421

Свариваемые толщины	Время сжатия	Ток сварки	Время сварки	Время выдержки	Сварочное усилие
s	$t_{сж}$	I_2	$t_{св}$	$t_{выд}$	$F_{св}$
мм	пер.	кА	пер.	пер.	кН
1,5 + 1,5	10...25	6,5	20	6	2,5

Группа сварки включает в себя два трансформатора, каждый из которых имеет по два вторичных витка. Вторичные витки 1 каждого трансформатора включены последовательно, как показано на рисунке 14. К выводам вторичных витков подключены токоведущие жёсткие шины. Каждой

токоведущей шине подключены параллельно по два гибких токоподвода 3, которые соединены со сварочными клещами 4. Сварочные клещи первого трансформатора выполняют 8 сварных точек. Сварочные клещи второго трансформатора выполняют 6 сварных точек. Последовательность выполнения сварных точек клещами трансформаторов обеспечивается пневматической схемой, которая поочередно подаёт команду на сжатие сварочных клещей.

1.3 Описание многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.651.421

Многоэлектродная сварочная машина МСМ 503.651.421 установлена на Сборочно-кузовном производстве, цех 1421, где происходит сварка кузовов автомобилей на платформе Kalina.

Назначение многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.651.421 – сварка наружных панелей задних левых дверей автомобиля – деталь 1118-6201013, представленная на рисунке 15. Эта деталь используется при производстве дверей автомобилей Granta FL и Datsun.

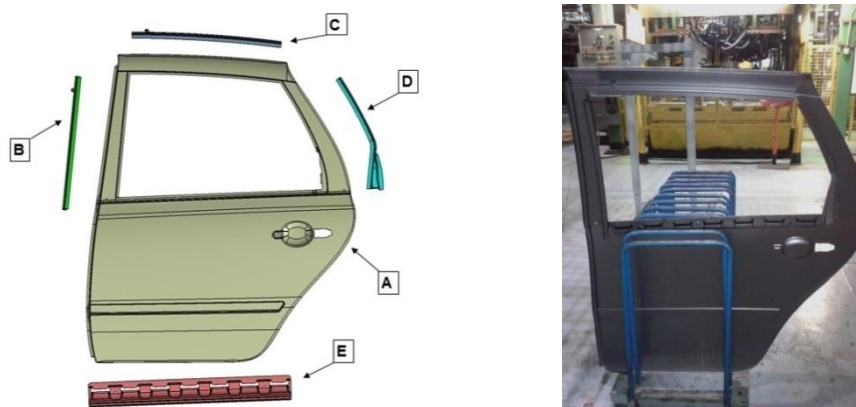


Рисунок 15 – Разузловка панели задней двери наружной в сборе 1118-6201013

В состав сварного узла, показанного на рисунке 15, входят такие детали, как 1118-6201015 – панель наружная (А), 1118-6201127 – соединитель панелей

передний (B), 1118-6201241 – соединитель панелей верхний (C), 1118-6201131 – соединитель панелей задний в сборе (D), 1118-6201041 – усилитель наружной панели горизонтальный (E).

Все заготовки выполнены из стали 08Ю, толщина заготовок составляет 0,8 и 1,0 мм. Выполнение сварных точек происходит на трёх постах, всего сваривается 27 точек: на первом посту – 7 точек, на втором посту – 9 точек, на третьем посту – 11 точек.



Рисунок 16 – Общий вид многоэлектродной сварочной машины MSM 503.651.421

Многоточечная сварочная машина работает следующим образом. Оператор вручную загружает соединитель панелей передний 1118-6201127 и соединитель панелей задний в сборе 1118-6201131 в нижнюю оснастку и выполняет их зажатие пневматическими прижимами. Потом на нижнюю оснастку загружают панель задней двери наружную 1118-62010156 и фиксируют её при помощи пневматических прижимов. Далее выполняется автоматическая сварка семи сварных точек, разжатие и выемка детали из оснастки первого поста.

После этого в оснастку второго поста загружают усилитель наружной панели горизонтальный 1118-6201041 и соединитель панелей верхний 1118-6201241 и фиксируют их пневматическими прижимами. Далее устанавливают панель задней двери наружная 1118-6201015 с прихваченным соединителем, фиксируют детали пневматическими прижимами. Происходит автоматическая сварка девяти точек, разжатие и выгрузка сваренных деталей.

На третьем посту выполняется автоматическая доварка путём простановки оставшихся одиннадцати точек.

Каждый пост машины МСМ 503.651.421 выполнен на базе С-образного прессы. Нижняя сварочная оснастка каждого поста смонтирована на нижней плите сварочного прессы, которая является неподвижной. Верхняя сварочная оснастка каждого поста смонтирована на верхней плите сварочного прессы, которая является подвижной. Нижняя оснастка, представленная на рисунке 17-а, включает в себя ложементы и прижимы для фиксации свариваемых деталей, контрэлектродные плиты с контрэлектродами и фальшь-электродами. Верхняя оснастка, представленная на рисунке 17-б, включает в себя узлы подачи сварочных клещей и пистолетов.



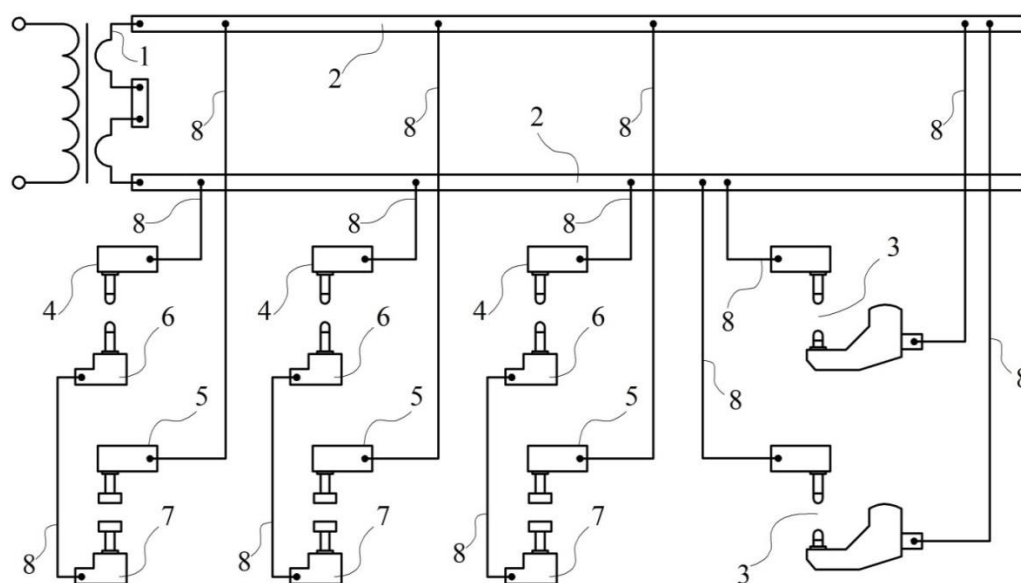
Рисунок 17 – Верхняя (а) и нижняя (б) оснастки сварочной машины МСМ 503.651.421

Поверхность кузовов подразделяется на четыре класса (зоны) по степени их заметности для потребителя. Свариваемая деталь является лицевым узлом кузова и относится к первому классу – с самыми высокими требованиями по качеству сварки. Сварка панели задней двери наружной в сборе 1118-6201013 производится двумя импульсами тока: первый импульс с малым током короткий – подогревающий, второй импульс основной – сварочный. Получается плавная нарастающая модуляция тока для избежания выплесков. На всей сварочной оснастке МСМ с наружной стороны панели двери установлены плоские электроды (на клещах) и контрэлектроды (напротив св. пистолетов), а усилие на электродах задано 1,5 кН – для исключения

образования вмятин. Режимы сварки узла 1118-6201013 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры режима сварки панели задней двери наружной в сборе 1118-6201013 на машине МСМ 503.651.421

Свариваемые толщины	Время сжатия	Ток сварки	Время сварки	Время выдержки	Сварочное усилие
s	$t_{сж}$	I_2	$t_{св}$	$t_{выд}$	$F_{св}$
мм	пер.	кА	пер.	пер.	кН
0,8 + 0,8	10...25	5,5	17	5	1,8
0,8 + 1,0	10...25	5,5	17	5	1,8



1 - вторичный витки сварочных трансформаторов, 2 – жёсткие токоведущие шины, 3 – токоведущие элементы сварочных клещей, 4 - токоведущие элементы сварочных пистолетов, 5 - токоведущие элементы сварочных фальш-пистолетов, 6 – контрэлектродные плиты с электродами, 7 – контрэлектродные плиты с фальш-электродами, 8 – гибкие токоведущие перемычки

Рисунок 18 – Принципиальная схема вторичного контура поста машины МСМ 503.651.421

Вторичные контуры сварочных постов многоэлектродной машины МСМ 503.651.421, которые представлены на рисунке 18, включают в себя: вторичный витки 1, жёсткие токоведущие шины 2, токоведущие элементы сварочных клещей 3, пистолетов 4, фальш-пистолетов 5, контрэлектродные плиты с электродами 6, контрэлектродные плиты с фальш-электродами 7, гибкие токоведущие перемычки 8.

1.4 Формулировка задач диссертационного исследования

Контактная сварка в массовом производстве выполняется с использованием многоэлектродных сварочных машин и сопровождается получением значительного количества дефектных соединений. Принятая нормативная документация, методики контроля и способы управления процессом сварки не позволяют получить стабильного качества соединений в условиях действия возмущений, характерных для массового производства.

Ужесточение требований к сварным соединениям, применение новых материалов, переход на высокопроизводительные режимы и сокращение объёмов разрушающего контроля делают актуальными исследования в области управления сварочными процессами и контроля состояния сварочного оборудования.

Назначение оптимальных параметров режима сварки, повышение эффективности управления и оценка состояния сварочного оборудования требуют знания величины активного сопротивления машины в режиме короткого замыкания. В настоящее время в современном производстве отсутствуют широко внедрённые методики оперативного измерения этой величины.

На основании вышеизложенного могут быть сформулированы цели диссертационного исследования:

- выполнить оценку возмущений, действие которых на процесс контактной сварки наиболее пагубно сказывается на стабильности качества в условиях массового производства;
- оценить возможности современной аппаратуры управления по компенсации выявленных возмущений;
- предложить методику оперативно оценки состояния контактных сварочных машин в условиях массового производства;
- апробировать предлагаемые решения и сделать выводы по целесообразности их внедрения в массовое производство.

2 Анализ возмущений контактной сварки

2.1 Особенности контактной точечной сварки в массовом производстве

Особенности массового производства с применением многоэлектродных машин делают проблематичным получение стабильного качества в условиях возмущений:

- существенные колебания напряжения питающей сети;
- существенный износ сварочных электродов и практическая невозможность их зачистки и замены в течение смены;
- существенные колебания сварочного усилия;
- интенсивный износ элементов вторичного контура и, как следствие, существенное изменение электрических параметров сварочного оборудования, что усугубляется высокой трудоёмкостью проведения измерений и необходимостью вывода оборудования из технологического цикла;
- проблемы размещения и большое число датчиков тока при их установке во вторичном контуре.

2.2 Влияние колебания напряжения сети на качество сварки

Номинальное напряжение питающей сети U_c , подаваемое на первичную обмотку сварочного трансформатора, составляет 380 В (для межфазного подключения) или 220 В (для однофазного подключения). Нагрузки на сеть от других потребителей контактной сварочной машины приводят к снижению напряжения сети относительно номинального. При этом такое снижение напряжения происходит как плавно (от действия на сеть других потребителей), так и скачкообразно (при включении контактной сварочной машины), как представлено на рисунке 19.

Существенная «просадка» напряжения происходит именно при включении сварочной машины. Глубина этой «просадки» зависит от множества факторов: параметров сети, мощности потребителей энергии, параметров режима сварки. На многоэлектродных сварочных машинах выполняется одновременное включение различного количества трансформаторов.

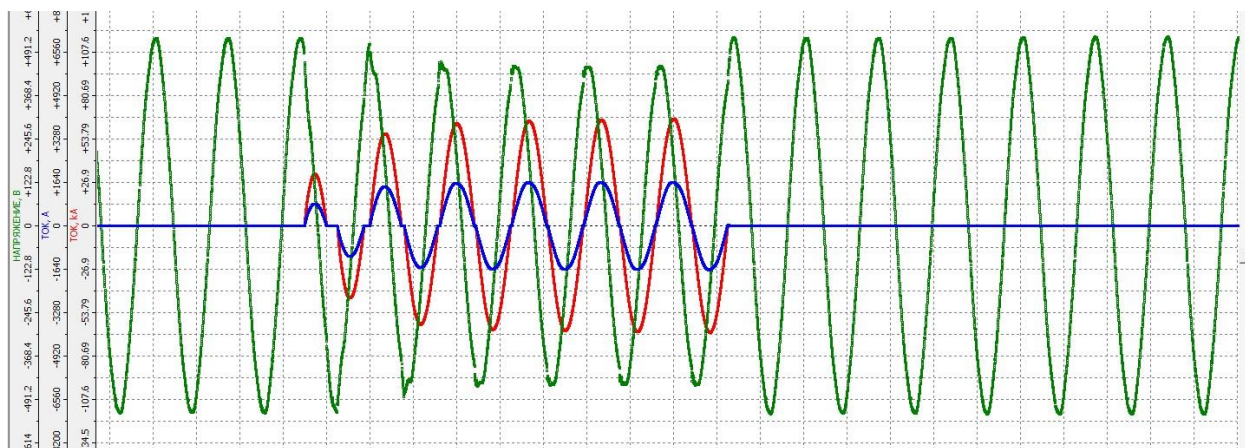


Рисунок 19 – Осциллограммы токов и напряжения при сварке при скачкообразном уменьшении напряжения сети

Снижение сетевого напряжения от номинального может привести к уменьшению прочности сварных точек, что представлено диаграммой на рисунке 20 [2], [13]. Повышение напряжения сети от номинального также может приводит к возникновению дефектов сварки – выплескам и прожогам.

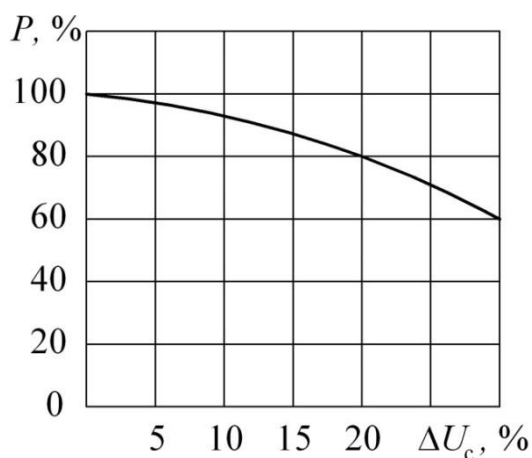


Рисунок 20 – Зависимость прочности сварных точек от напряжения сети [13]

Оценку влияния напряжения сети на прочность сварной точки при различных способах управления контактной сваркой выполняли на машине МТПУ-300, представленной на рисунке 21. Параметры режима регистрировали при помощи регистратора сварочных процессов РКДП-0401, представленного на рисунке 22. Напряжение сети измеряли также при помощи регистратора РКДП-0401, подключая щупы со стороны первичного контура контактной машины в силовом шкафу, как показано на рисунке 23.

Измерение сварочного тока выполняли со стороны вторичного контура при помощи пояса Роговского, представленного на рисунке 24. Управление контактной сваркой осуществляли при помощи системы компьютерного управления СК-300, представленного на рисунке 25 [2].



Рисунок 21 – Машина контактной сварки МТПУ-300



Рисунок 22 - Регистратор РКДП-0401



Рисунок 23 – Подключение датчика первичного напряжения со стороны первичной обмотки трансформатора контактной машины в силовом шкафу



Рисунок 24 – Установка пояса Роговского на хоботе во вторичном контуре контактной сварочной машины



Рисунок 25 – Система компьютерного управления контактной сваркой СК-300

Выполняли контактную сварку образцов из стали 08Ю толщиной 0,8+0,8 мм. После сварки образцы разрушали по методике [65] на разрывной машине Н50КТ (Tinius Olsen, Ltd., Англия), представленной на рисунке 8.

При сварке образцов применялись следующие параметры режима сварки: диаметр рабочей поверхности электродов $d_{эл} = 4,6$ мм, ступень трансформатора – V (коэффициент трансформации $K_T = 100$), усилие сжатия электродов $F_{св} = 2,0$ кН, длительность импульса сварочного тока $t_{св} = 0,14$ с, задаваемый сварочный ток (при управлении со стабилизацией сварочного тока) $I_{св} = 8$ кА, задаваемый угол открытия тиристорov (при сварке без стабилизации сварочного тока) $\alpha = 80$ °эл. Сварку выполняли при различной нагрузженности сети другими потребителями электрической энергии, при этом напряжение сети составляло $U_c = 340...380$ В.

Установлено, что сварка в условиях уменьшения сетевого напряжения от номинального без стабилизации сварочного тока приводит к получению сварных точек со сниженной прочностью, что представлено на рисунке 26-а. В тоже время, сварка со стабилизацией сварочного тока позволяет получать стабильное качество соединений и при снижении сетевого напряжения, что представлено на рисунке 26-б.

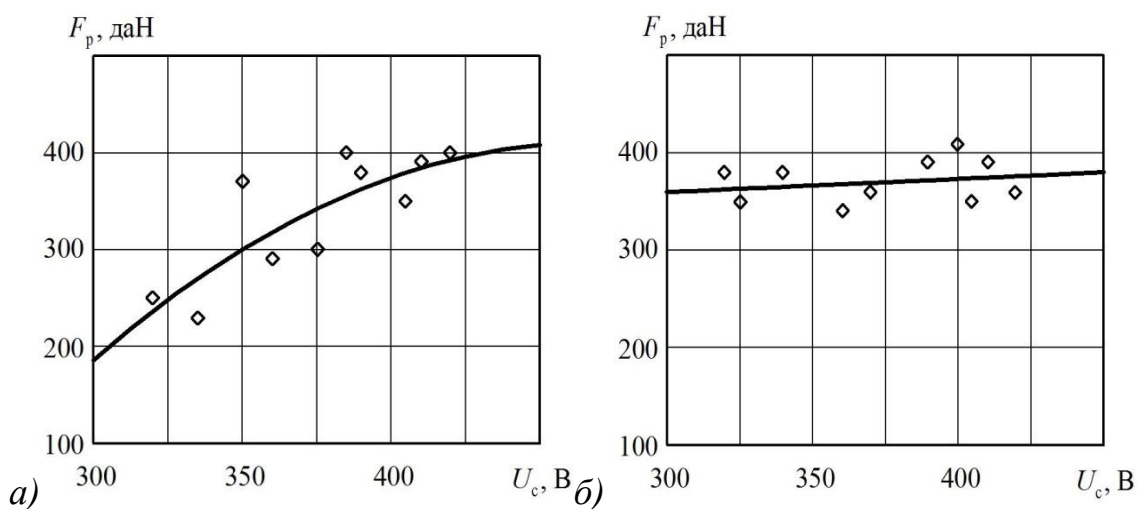


Рисунок 26 - Зависимость прочности точек на срез от напряжения сети U_c для образцов толщиной $0,8+0,8$ мм при сварке без стабилизации сварочного тока (а) и со стабилизацией сварочного тока (б)

Таким образом, можно сделать вывод, что системы управления контактной сваркой, работающие по принципу стабилизации сварочного тока, позволяют компенсировать влияние колебаний сетевого напряжения на прочность сварных точек.

2.3 Влияние износа электродов на качество сварки

Интенсивная работа сварочных электродов приводит к их износу в течение рабочей смены, как показано на рисунке 27. При работе на стационарных и подвесных сварочных машинах, как и при роботизированной сварке, возможна периодическая замена (или переточка) электродов. В случае же применения многоэлектродных машин оперативная замена или переточка электродов затруднены. Поэтому необходимо считаться с таким возмущением, как износ электродов и компенсировать его влияние на качество сварки.



Рисунок 27 – Износ сварочных электродов в течение рабочей смены при интенсивной сварке на многоэлектродных сварочных машинах

Во второй серии экспериментов выполняли контактную сварку образцов из стали 08Ю толщиной $0,8+0,8$ мм электродами с различной степенью износа. При сварке образцов применялись следующие параметры режима сварки: диаметр рабочей поверхности электродов $d_{эл} = 3, 4, 5, 6$ и 7 мм, степень трансформатора – V (коэффициент трансформации $K_T = 100$), усилие сжатия электродов $F_{св} = 2,0$ кН, длительность импульса сварочного тока $t_{св} = 0,14$ с, задаваемый сварочный ток (при управлении со стабилизацией сварочного тока) $I_{св} = 8$ кА, задаваемый угол открытия тиристорov (при сварке без стабилизации сварочного тока) $\alpha = 80$ °эл. Сварку выполняли при

номинальном напряжении питающей сети (влияние других потребителей на сеть было минимальным).

Установлено, что износ сварочных электродов приводит к снижению прочности сварных точек как в случае сварки без стабилизации сварочного тока, так и в случае сварки со стабилизацией сварочного тока, как показано на рисунке 28-а и рисунке 28-б.

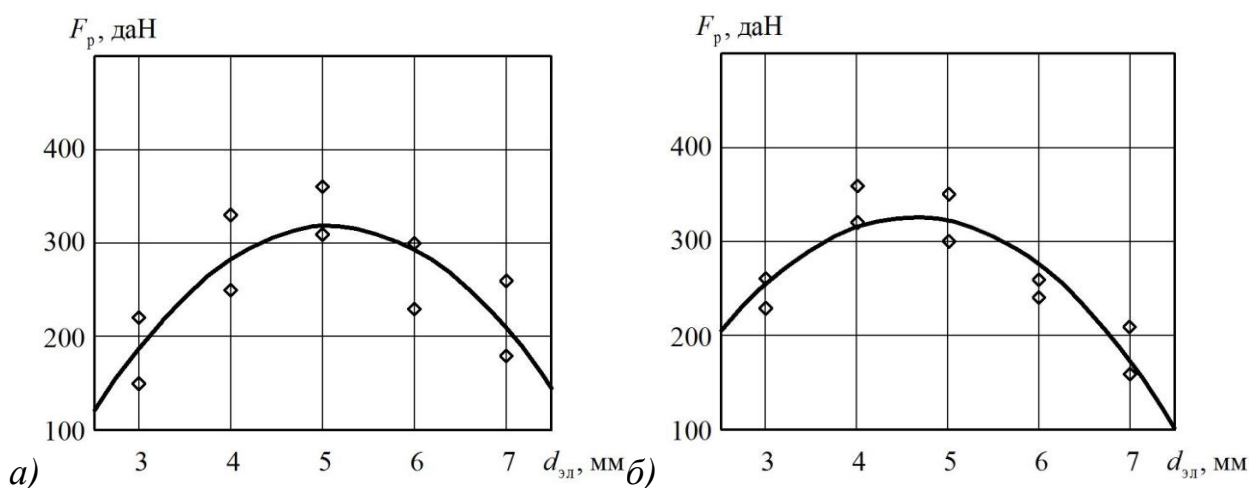


Рисунок 28 – Зависимость прочности точек на срез от диаметра $d_{эл}$ электрода для образцов толщиной 0,8+0,8 мм при сварке без стабилизации сварочного тока (а) и со стабилизацией сварочного тока (б)

При этом стабилизация сварочного тока около заданного значения даёт худшие результаты по сравнению со сваркой без стабилизации тока, что подтверждает более ранние работы других исследователей [2], [10], [12], [14], [52].

2.4 Влияние стабильности сжатия электродов на качество сварки

Контактная точечная сварка проходит в условиях значительных колебаний величины сварочного усилия $F_{св}$, которые возникают по причине инерционности подвижных элементов привода сжатия, износа привода сжатия. Также на стабильность сварочного усилия влияет качество сборки конструкции и необходимость «дожима» деталей электродами при

проставке некоторых точек. Величина сварочного усилия существенно снижается при перекосе деталей относительно электродов контактной машины, сдвига одного электрода относительно другого [16], [19], [61].

В третьей серии экспериментов выполняли контактную сварку образцов из стали 08Ю толщиной $0,8+0,8$ мм с различной величиной сварочного усилия. При сварке образцов применялись следующие параметры режима сварки: диаметр рабочей поверхности электродов $d_{эл} = 4,6$ мм, степень трансформатора – V (коэффициент трансформации $K_T = 100$), усилие сжатия электродов изменялось в диапазоне $F_{св} = 1,0 \dots 3,0$ кН, длительность импульса сварочного тока $t_{св} = 0,14$ с, задаваемый сварочный ток (при управлении со стабилизацией сварочного тока) $I_{св} = 8$ кА, задаваемый угол открытия тиристоров (при сварке без стабилизации сварочного тока) $\alpha = 80^\circ$ эл. Сварку выполняли при номинальном напряжении питающей сети (влияние других потребителей на сеть было минимальным). Контроль усилия $F_{св}$ сжатия электродов производили с использованием измерителя МИКС-2М (ЗАО «ЭЛЕКТРИК-МИКС»), представленного на рисунке 29.

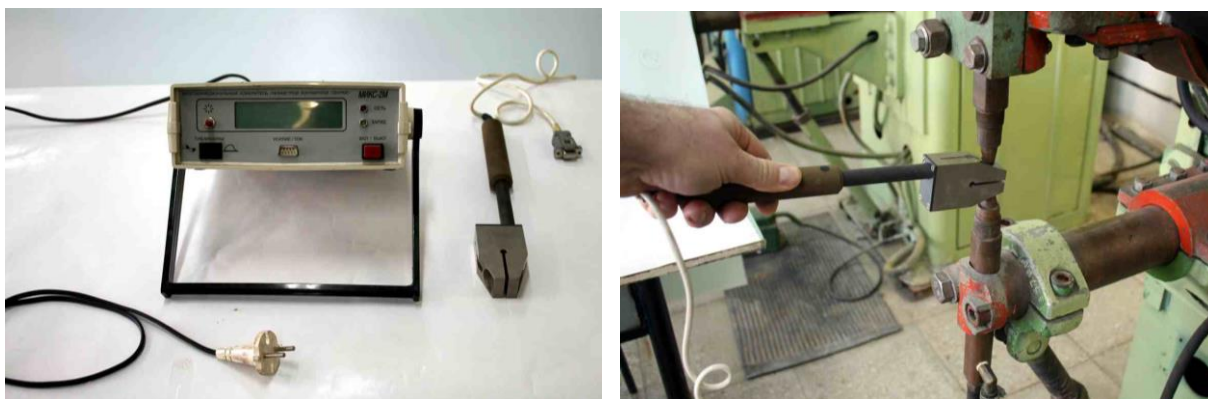


Рисунок 29 – Измерение сварочного усилия при помощи регистратора МИКС-2М

Установлено, что сварка в условиях отклонения усилия $F_{св}$ сжатия электродов от номинального приводит к получению соединений со сниженной прочностью при отсутствии стабилизации сварочного тока, как показано на рисунке 30-а.

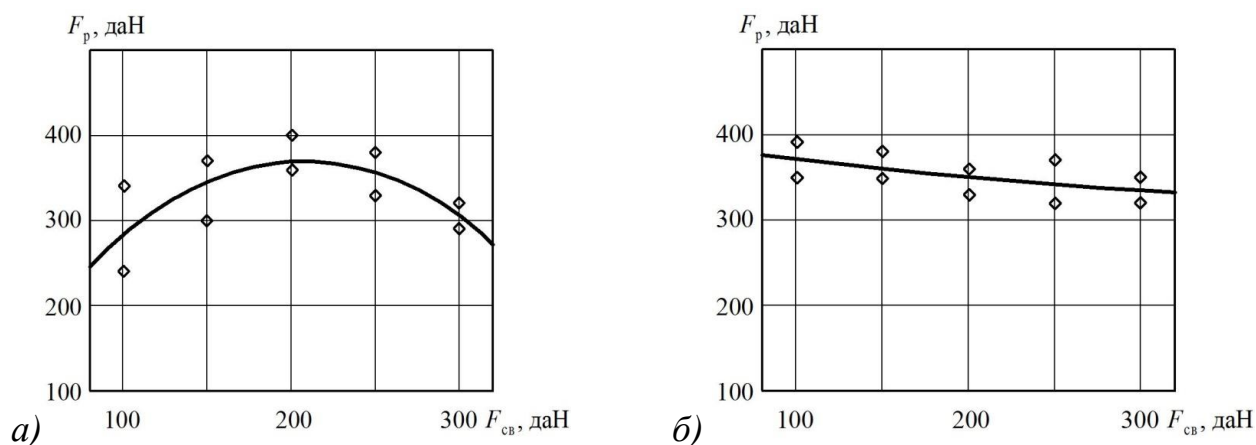


Рисунок 30 – Зависимость прочности точек на срез от изменения усилия $F_{св}$ на электродах для образцов толщиной 0,8+0,8 мм при сварке без стабилизации сварочного тока (а) и со стабилизацией сварочного тока (б)

В тоже время стабилизация сварочного тока позволяет обеспечить стабильное качество в условиях колебания усилия сжатия электродов, как показано на рисунке 30-б.

2.5 Особенности износа элементов вторичного контура многоэлектродных машин

Интенсивный износ элементов вторичного контура постоянно наблюдается при контактной сварке в условиях массового производства. Особенно износу подвержены токоподводящие перемычки и кабели многоэлектродных сварочных машин, представленные на рисунке 31. Срок службы этих элементов вторичного контура составляет порядка 4...8 недель и зависит от интенсивности сварки, параметров режима и особенностей конструкции конкретного узла многоэлектродной сварочной машины [21], [56], [57]. Частичное или полное разрушение многожильной части токоведущего кабеля происходит по причине перетирания или перегорания медных волосков и находится в числе основных причин аварийной остановки сварочного оборудования. Этот процесс вплоть до полного разрушения перемычки внешне никак себя не проявляет и может не только привести к аварийной остановке сварочной линии, но и получению дефектных сварок.



Рисунок 31 – Внешний вид и частичное разрушение токоведущей части гибких неохлаждаемых перемычек сечением 300 мм² после интенсивной сварки

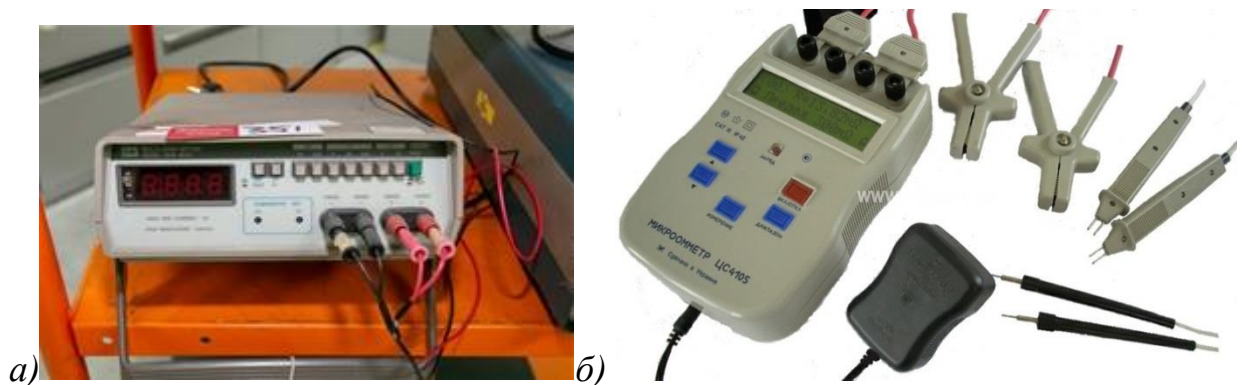


Рисунок 32 – Оборудование, применяемое для контроля омического сопротивления элементов вторичного контура GOM-801G (а) и ЦС-4105 (б)

Оценку состояния элементов вторичного контура осуществляют по величине омического сопротивления каждого элемента. Величину этого сопротивления периодически контролируют с использованием стандартного оборудования - микроомметр ЦС-4105, миллиомметр GOM-801G, представленные на рисунке 32. Также измерение омического сопротивления вторичного контура может быть выполнено по схеме «амперметр–вольтметр» [37], [46].

2.6 Особенности конструкции элементов вторичного контура

Вторичный контур многоэлектродных сварочных машин зачастую имеет достаточно сложную конструкцию, представленную на рисунке 33, которая не позволяет размесить датчики вторичного тока.



Рисунок 33 – Примеры вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин, на которых затруднена установка датчиков тока

При этом следует учитывать, что особенности размещения сварочных пистолетов относительно выполняемых точек требует применения большого числа датчиков, равного количеству сварочных пистолетов, что существенно скажется на стоимости управляющей аппаратуры.

2.7 Особенности управления током сварки в условиях износа электродов

Интенсивная сварка в условиях массового производства вызывает ускоренный износ сварочных электродов, который проявляется в увеличении площади рабочей поверхности и её загрязнении. Увеличение площади рабочей поверхности сварочных электродов снижает плотность тока и усиливает отвод теплоты из зоны сварки, что может повлиять на формирование ядра сварной точки и стать причиной появления непроваров.

Повышение стабильности качества сварки в условиях износа электродов требует проведения коррекции режимов сварки. В ходе ранее проведённых исследований [11], [33] установлено, что отрицательное влияние износа электродов на качество сварки может быть снижено путём увеличения силы сварочного тока. Простейшая коррекция тока предусматривает его ступенчатое увеличение по мере выполнения сварок и реализована в большинстве промышленных регуляторов контактной сварки [38], [41], [43], [45], [49], [63], [64].

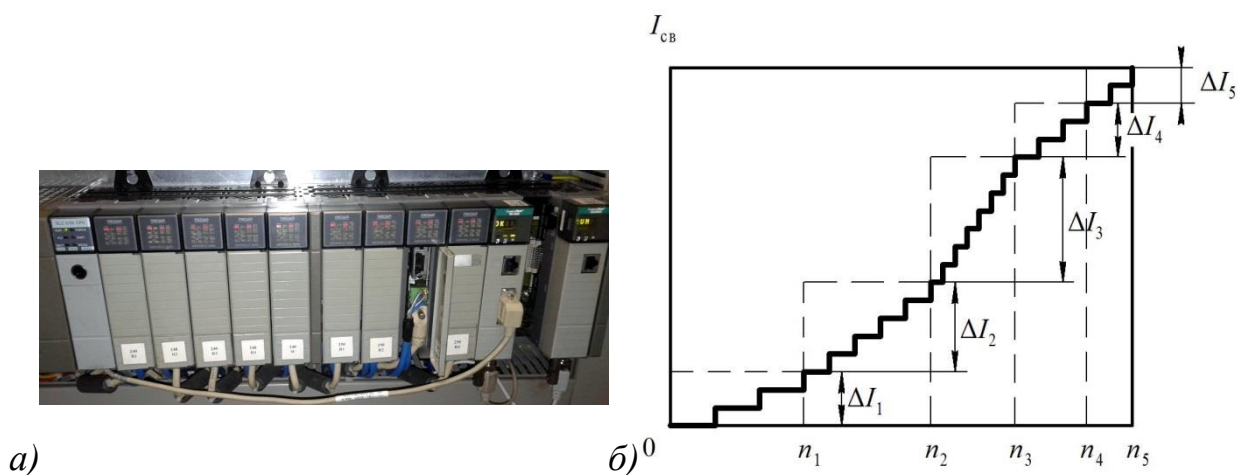


Рисунок 34 - Модуль управления сваркой MedWeld 3005 (а) и алгоритм компенсации износа электродов (б)

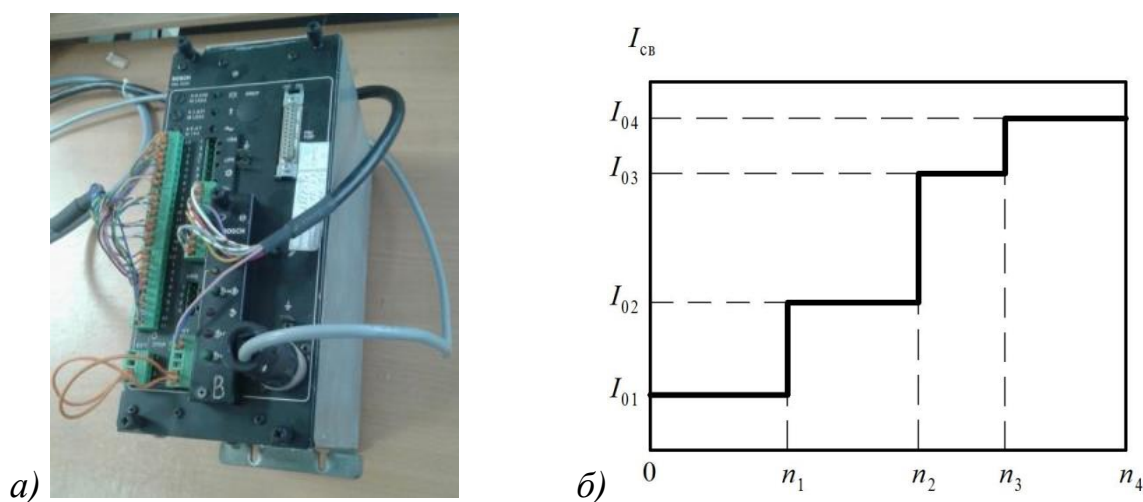
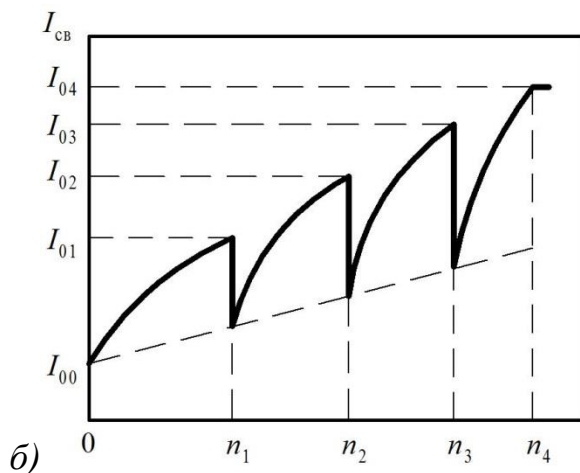


Рисунок 35 - Модуль управления сваркой PS 2000 (а) и алгоритм компенсации износа электродов (б)



a)

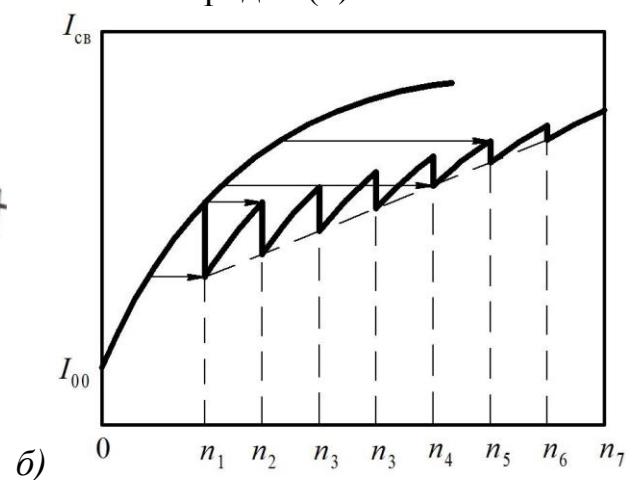


б)

Рисунок 36 - Модуль управления сваркой PST 6000 (a) и алгоритм компенсации износа электродов (б)



a)

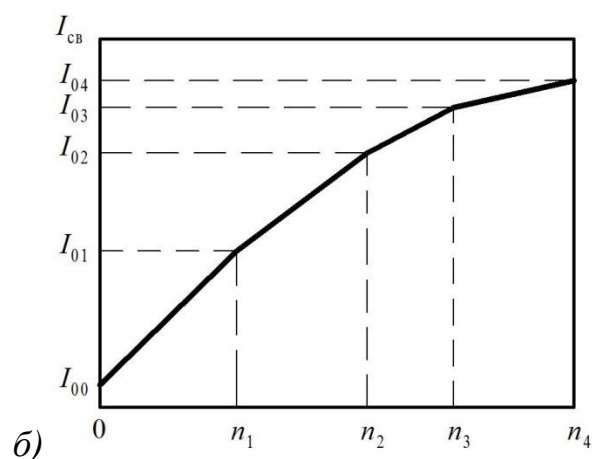


б)

Рисунок 37 - Модуль управления сваркой T1400 (a) и алгоритм компенсации износа электродов (б)



a)



б)

Рисунок 38 - Модуль управления сваркой ST 214 (a) и алгоритм компенсации износа электродов (б)

Как показала практика, ступенчатое регулирование тока, которая не основана на оценке реального состояния сварочных электродов, может привести как к избыточному, так и недостаточному увеличению сварочного тока. Тогда в первом случае повышается вероятность образования выплесков, а во втором – непроваров. Повысить эффективность ступенчатого управления током в условиях износа электродов можно, если состояние рабочей поверхности электродов оценивать по результатам измерения сопротивления между электродами [4], [42], [44], [50], [69].

Исследование особенностей формирования сварной точки в условиях износа сварочных электродов выполняли на образцах толщиной 0,8+0,8 мм и 1,5+1,5 мм. Материал образцов – сталь 08Ю без покрытия, сталь 08Ю с электроцинковым покрытием и сталь 01ЮТ с горячецинковым покрытием. Сварку выполняли на контактной машине МТ-1933, представленной на рисунке 39.



Рисунок 39 – Контактная сварочная машина МТ-1933

После выполнения каждых 500 сварных точек (для образцов без покрытия) и 100 сварных точек (для образцов с защитным цинковым покрытием) измеряли диаметр ядра сварной точки. Установленные ГОСТ 15878-79 пороговые значения диаметра ядра сварной точки составляют 3,5 мм для образцов толщиной 0,8+0,8 мм и 5 мм для образцов толщиной 1,5+1,5 мм. Если измеренный диаметр ядра приближался к пороговому значению, принимали решение о корректировке сварочного тока в сторону его увеличения согласно таблице 7. Для сварки образцов толщиной 0,8+0,8 мм принимали параметры режима: усилие на электродах $F_{св}=2,4$ кН, длительность импульса сварочного тока $t_{св}=0,2$ с. Для образцов толщиной 1,5+1,5 мм принимали параметры режима: усилие на электродах $F_{св}=4,0$ кН, длительность импульса сварочного тока $t_{св}=0,4$ с.

Таблица 7 – Сила сварочного тока для рассматриваемых образцов

Тип покрытия	Материал заготовок	Ток сварки, кА	Количество точек
отсутствует	08Ю	7,5	1...13000
	08Ю	8,2	1...10500
двухсторонне горячецинковое	01ЮТ	8,0	1...600
		8,9	600...1600
		9,8	1600...2400
		10,8	2400...2800
		11,6	2800...3100
	01ЮТ	8,9	1...400
		9,7	400...1200
		10,5	1200...2100
		11,5	2100...2700
	двухсторонне электроцинковое	08Ю	7,9
8,6			1700...3100
9,6			3100...4200
10,5			4200...5300
11,2			5300...6100
08Ю		8,5	1...1000
		9,4	1000...2500
		10,4	2500...4400
		11,2	4400...5100

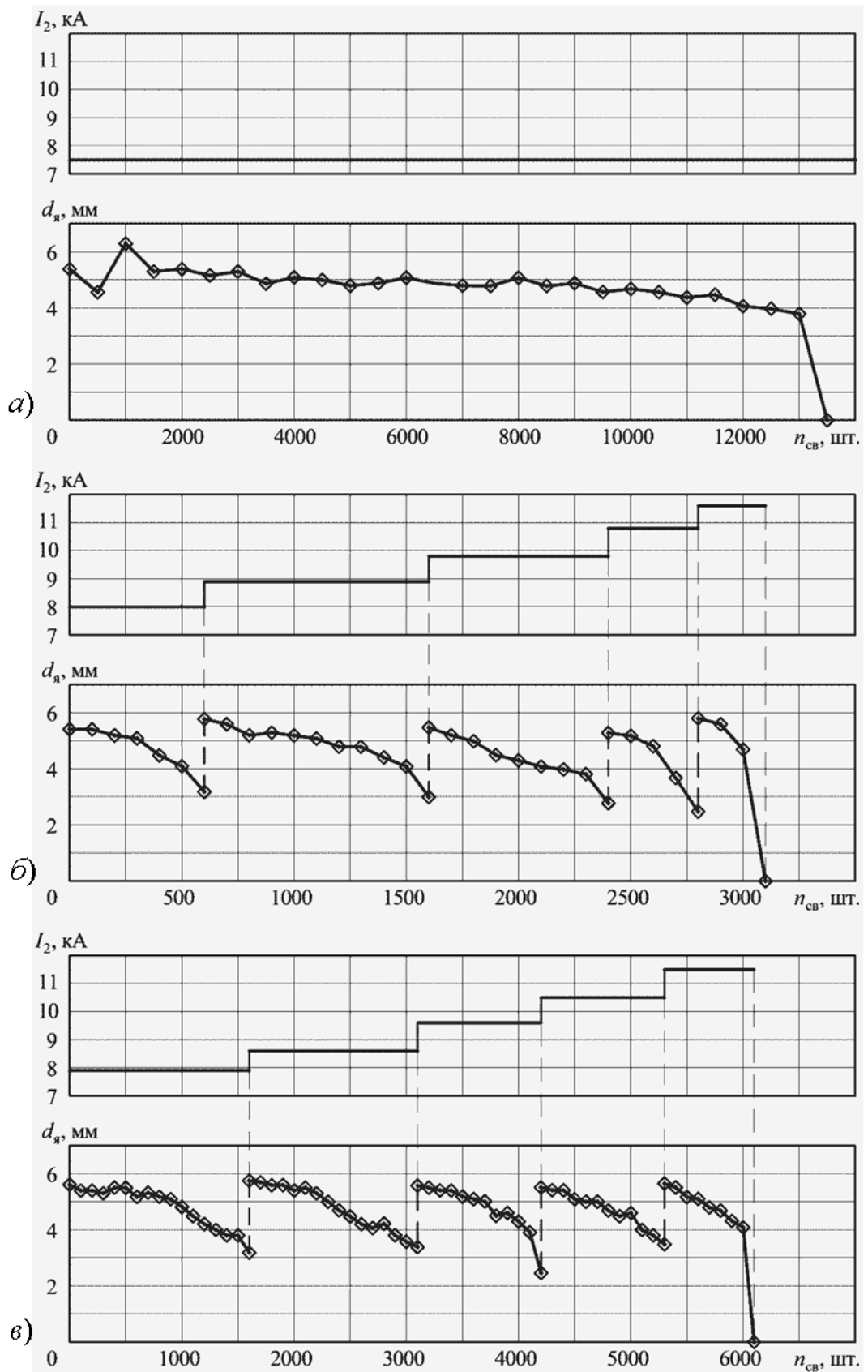


Рисунок 40 – Диаметр ядра сварной точки при толщине образцов 0,8+0,8 мм из стали без покрытия (а), с горячецинковым (б) и электроцинковым (в) покрытием

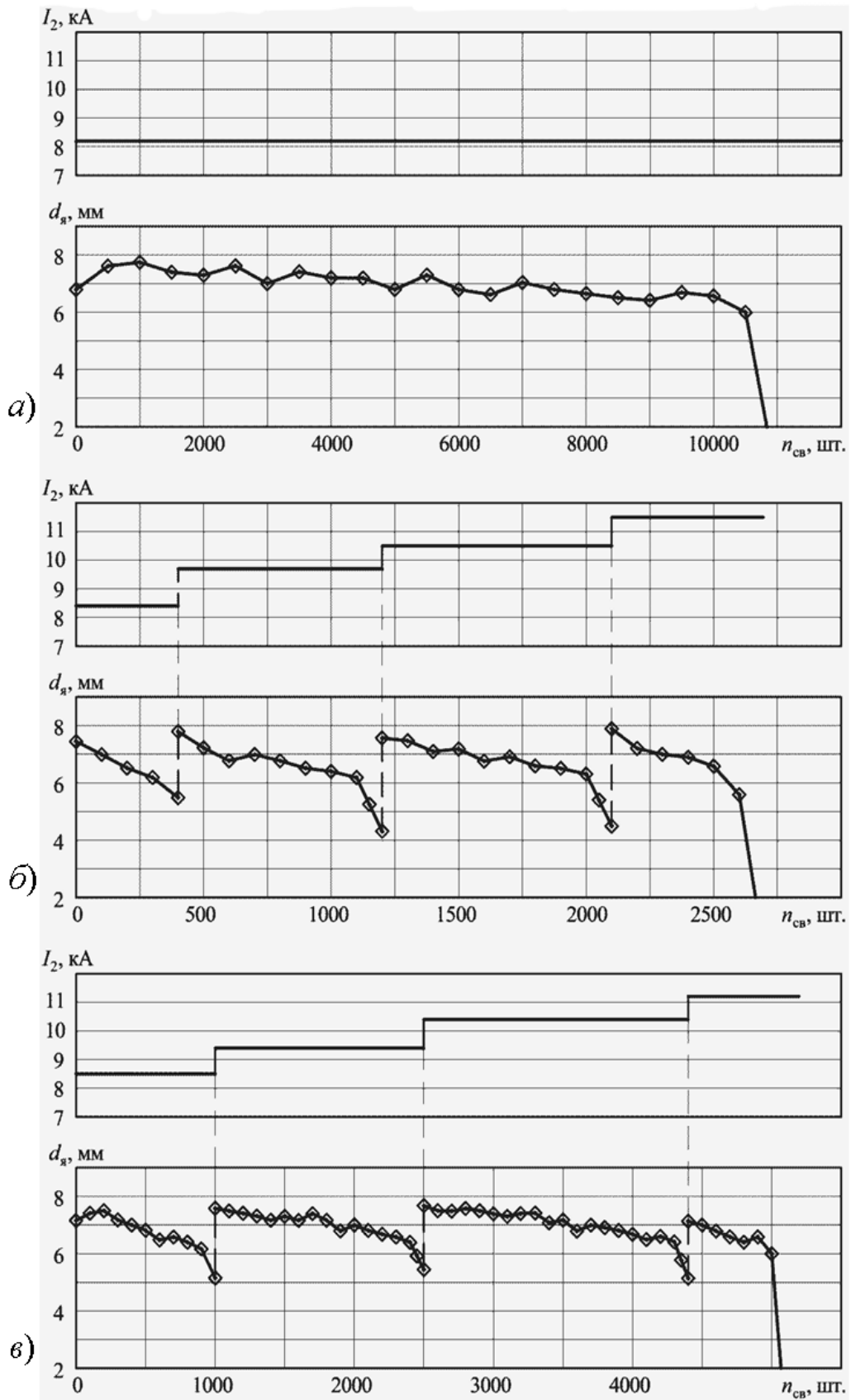


Рисунок 41 – Диаметр ядра сварной точки при толщине образцов 1,5+1,5 мм из стали без покрытия (а), с горячецинковым (б) и электроцинковым (в) покрытием

В результате проведённых исследований установлено, что сварка сталей без защитного цинкового покрытия может быть проведена без ступенчатого увеличения тока. В тоже время сварка сталей с защитным цинковым покрытием требует ступенчатого увеличения тока по мере выполнения сварных точек [41], [43], [45].

Выводы по второму разделу

Сформулированы затруднения контактной сварки в условиях массового производства, снижающие стабильность качества соединений: к которым относятся колебания напряжения питающей сети, износ сварочных электродов, низкая стабильность сварочного усилия, интенсивный износ элементов вторичного контура, проблемы размещения датчиков тока во вторичном контуре.

В случае совокупного действия первого и пятого затруднений колебание напряжения сети может привести к получению непроваров в условиях отсутствия стабилизации сварочного тока. В тоже время в системах со стабилизацией сварочного тока влияние колебаний сетевого напряжения на качество сварки может быть устранено.

В случае интенсивного износа электродов стабилизация сварочного тока не может в полной мере обеспечить стабильное качество выполняемых соединений даже при ступенчатом управлении током. Повышение эффективности систем управления сварочным током должно быть основано на оперативной оценке состояния сварочных электродов по результатам измерения сопротивления между электродами.

В случае низкой стабильности усилия сжатия электродов наилучшим образом показали себя системы со стабилизацией сварочного тока.

Интенсивный износ элементов вторичного контура, особенно на многоэлектродных сварочных машинах, требует разработки методик оперативной оценки состояния вторичных контуров.

3 Оперативная диагностика состояния вторичных контуров многоэлектродных контактных машин

3.1 Постановка проблемы

Массовое производство характеризуется высокой интенсивностью использования сварочного оборудования. Повышенные токовые и механические знакопеременные нагрузки приводят к ускоренному износу токоведущих элементов вторичного контура, в частности, интенсивному износу подвергаются их токоподводящие кабели и перемычки. В результате износа этих частей вторичного контура повышение их омического сопротивления может достигать сотен мкОм [21], [56], [57]. Такое изменение омического сопротивления обычно отслеживается с применением стандартных измерительных средств (микроомметр Ф-415, миллиомметр GOM-801G).

Проведение таких измерений предусматривает временную остановку контактной сварочной машины, при этом происходит остановка всей автоматической линии. Далее проводится измерение омического сопротивления каждого элемента вторичного контура и его сравнение с паспортными значениями [56], [57]. По результатам этого сравнения принимается решение о возможности продолжения работы с этим токоведущим элементом или его замене.

При контроле омического сопротивления всего вторичного контура на машине МСМ 503.651.421 выполняют смыкание электродов (до касания электрода сварочного пистолета контрэлектрода) через диэлектрическую проставку, установку измерительных щупов на сварочных электродах и измерение омического сопротивления при помощи микроомметра, как показано на рисунке 42. При контроле омического сопротивления всего вторичного контура на машине МСМ 503.618.421 подключают измерительные щупы к электродам сварочных пистолетов, как показано на рисунке 43.

Измеренное значение сопротивления сваривают со значением, полученным при первом измерении после ремонта контура (замены его элементов), принимают решение о величине суммарного износа элементов контура и возможности его дальнейшей эксплуатации.



Рисунок 42 – Измерение омического сопротивления вторичного контура на многоэлектродной машине МСМ 503.651.421: установка измерительных щупов на сварочных электродах (а) и снятие показаний прибора (б)



Рисунок 43 – Измерение омического сопротивления вторичного контура на многоэлектродной машине МСМ 503.618.421: установка измерительных щупов на сварочных электродах вторых клещей (а), установка измерительных щупов на сварочных электродах четвертых клещей (б)

Количество сварных точек, выполняемых на конкретной детали кузова автомобиля с применением многоэлектродных сварочных машин, может достигать нескольких десятков. Особенности геометрии детали, расположения сварных точек и удобства подвода к месту сварки электродов определяет количество и место размещения сварочного инструмента (клещи и пистолеты) и трансформаторов. А это, в свою очередь, влияет на геометрию вторичных контуров. Таким образом, на одной многоэлектродной сварочной машине присутствует несколько контуров с различной геометрией, составом, количеством и длиной токоведущих элементов. Каждый вторичный контур обладает уникальным набором характеристик (активное и индуктивное сопротивление, скорость износа элементов).

Таким образом, оценка состояния элементов вторичного контура является утомительной и трудоёмкой процедурой, выполнение которой делает необходимым периодическую остановку автоматической линии для проведения необходимых замеров.

3.2 Математическое описание способа оперативной оценки состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин

Режим короткого замыкания возникает в случае включения контактной машины при короткозамкнутых электродах (т.е. сжатых сварочных электродах без размещения между ними деталей). В таком случае во вторичном контуре машины будет протекать вторичный ток короткого замыкания $I_{2к}$. Следует отметить, что режим короткого замыкания не является рабочим режимом (сварка происходит с размещением деталей между сварочными электродами), однако не является аварийным. Токоведущие элементы вторичного контура контактных машин рассчитаны на кратковременное включение в режиме короткого замыкания. Поэтому

правильно проведённый опыт короткого замыкания не может стать причиной аварии.

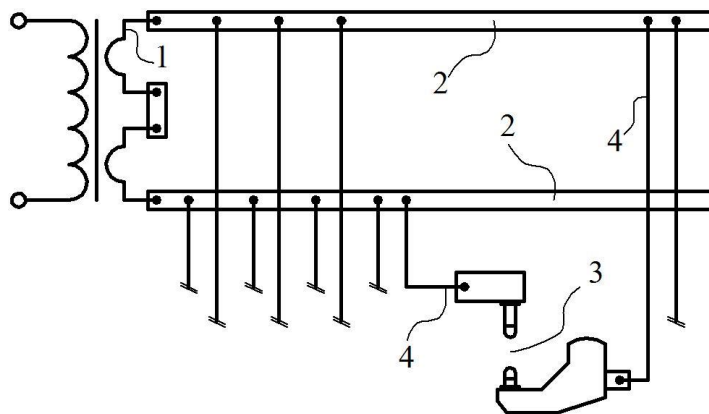
Контактная сварочная машина характеризуется электрическими параметрами, которые можно измерить со стороны вторичного контура – активным $R_{2к}$ и индуктивным $X_{2к}$ сопротивлениями в режиме короткого замыкания.

Следует отметить, что активное сопротивление вторичного контура переменному току в режиме короткого замыкания будет существенно отличаться от омического сопротивления (сопротивления постоянному току, измеренного при помощи микрометра). Это объясняется, во-первых, наличием поверхностного эффекта при протекании через вторичный контур переменного тока (в режиме сварки или короткого замыкания), в результате которого плотность тока вблизи поверхности проводника будет выше плотности тока внутри проводника, что приводит к росту активного сопротивления. Во-вторых, на величину активного сопротивления влияет приведённое сопротивление первичной обмотки сварочного трансформатора, которое не учитывается при измерениях омического сопротивления.

Для проведения вычислительного эксперимента вычленим из схемы вторичного контура, показанной на рисунке 18, единичный вторичный контур, как на рисунке 44. Влияние других вторичных контуров других сварочных инструментов на измеряемые величины активного $R_{2к}$ и индуктивного $X_{2к}$ сопротивления отсутствует, так как их электроды в рассматриваемом случае остаются разомкнутыми.

Единичный вторичный контур может быть смоделирован последовательно соединёнными активным $R_{2к}$ и индуктивным $X_{2к}$ сопротивлениями, как представлено на рисунке 45. Эти сопротивления являются результирующими сопротивлениями, которые учитывают приведённые к вторичному контуру все составляющие сопротивления (активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки трансформатора, активное и индуктивное сопротивления элементов вторичного контура). Ключ

К имитирует работу сварочных тиристоров при фазовом управлении контактной сваркой. На входы схем подаётся напряжение U_2 , определяемое сетевым напряжением U_c и коэффициентом трансформации K_T как $U_2 = U_c / K_T$.



1 – вторичный виток сварочного трансформатора; 2 - жёсткие токоведущие шины; 3 – токоведущие элементы сварочных клещей; 4 - гибкие токоведущие перемычки

Рисунок 44 – Единичный вторичный контур для проведения вычислительного эксперимента

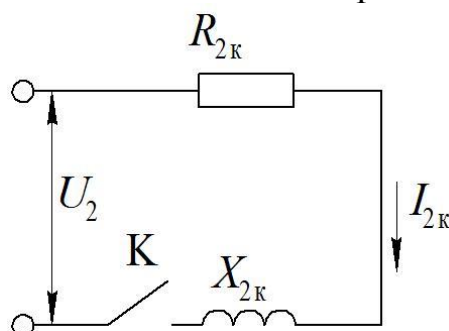


Рисунок 45 – Электрическая схема замещения контактной сварочной машины при работе единичного контура в режиме короткого замыкания

Если выполнить смыкание сварочных электродов без размещения между ними свариваемых деталей и на входы первичной обмотки сварочного трансформатора подать синусоидальное сетевое напряжение U_c , то сварочная машина будет работать в режиме короткого замыкания с однофазным включением, как показано на рисунке 46-а. При этом во вторичном контуре будет развиваться однофазный вторичный ток короткого замыкания, отстающий по фазе от сетевого напряжения на угол φ . Величина однофазного тока $I_{2п}$ вычисляется как:

$$I_{2п} = \frac{U_c}{K_T \sqrt{R_{2к}^2 + X_{2к}^2}}, \quad (2)$$

где $I_{2п}$ – полнофазный вторичный ток в режиме короткого замыкания;

U_c – сетевое напряжение;

K_T – коэффициент трансформации на данной ступени сварочного трансформатора;

$R_{2к}$ и $X_{2к}$ – активное и индуктивное сопротивление контактной машины в режиме короткого замыкания.

Отставание полнофазного тока $I_{2п}$ от сетевого напряжения определяется углом φ сдвига фаз тока и напряжения и может быть рассчитано через коэффициент мощности как:

$$\cos \varphi = \frac{R_{2к}}{\sqrt{R_{2к}^2 + X_{2к}^2}}, \quad (3)$$

где $R_{2к}$ и $X_{2к}$ – активное и индуктивное сопротивление контактной машины в режиме короткого замыкания;

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности в режим короткого замыкания.

Контактные сварочные машины обычно не работают в режиме полнофазного включения. В основном происходит работа в режиме фазового регулирования, осуществляемого при помощи тиристорov, обеспечивающих подачу сетевого напряжения U_c на первичную обмотку трансформатора с заданной задержкой α относительно перехода сетевого напряжения через ноль. Если выполнить смыкание сварочных электродов без размещения между ними свариваемых деталей и на входы первичной обмотки сварочного трансформатора подать первичное напряжение с заданным углом включения тиристорov α , то машина будет работать в режиме короткого замыкания с фазовым регулированием, как показано на рисунке 46-б.

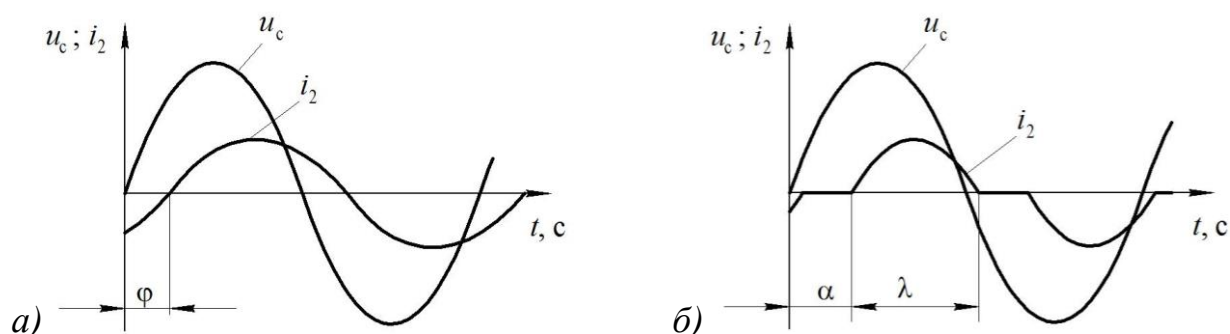


Рисунок 46 – Диаграммы тока и напряжения при включении контактной в режиме короткого замыкания при однофазном режиме (а) и фазовом регулировании (б)

При этом действующее значение вторичного тока $I_{2к}$ вычисляется через однофазный ток $I_{2п}$ и коэффициент регулирования k_i как:

$$I_{2к} = I_{2п} \cdot k_i = \frac{U_c \cdot k_i}{K_T \sqrt{R_{2к}^2 + X_{2к}^2}}. \quad (4)$$

Таким образом, из формулы (4) видно, что за счёт фазового регулирования возможна коррекция вторичного тока $I_{2к}$ в сторону его уменьшения от однофазного тока $I_{2п}$. Это уменьшение определяется коэффициентом регулирования k_i , величина которого зависит от углов открытия тиристоров α и сдвига фаз φ .

Из (3) и (4) можно выразить активное сопротивление $R_{2к}$:

$$R_{2к} = \frac{U_c \cdot k_i \cdot \cos \varphi}{I_{2к} \cdot K_T}. \quad (5)$$

Таким образом, из формулы (5) становится понятным, что для определения величины активного сопротивления контура $R_{2к}$ в режиме короткого замыкания не необходимо знать следующие величины:

- напряжение питающей сети U_c (измеряется стандартными средствами);
- коэффициент трансформации K_T (определяется по документации на сварочную машину или опытом холостого хода);
- вторичный ток $I_{2к}$ в режиме короткого замыкания (измеряется при помощи стандартного измерителя тока, например, МИКС-2М).

Кроме того, в формуле (3.4) присутствует две физических величины, непосредственное измерение которых на сварочной машине произвести затруднительно (коэффициент регулирования k_i и коэффициент мощности $\cos \varphi$).

3.3 Вычисление коэффициентов регулирования и мощности

Величина коэффициента мощности $\cos \varphi$ в условиях фазового регулирования может быть определена с использованием параметров фазового регулирования – угла открытия тиристорov α и угла проводимости тиристорov λ , как показано на рисунке 46-б, для каждого периода сварочного тока однозначно определяется через известные значения α и λ решением уравнения [36]

$$\sin(\lambda + \alpha - \varphi) / \sin(\alpha - \varphi) = \exp(-\lambda \operatorname{ctg} \varphi). \quad (6)$$

Результаты численного решения уравнения (6) могут быть представлены графически в виде номограмм, как на рисунке 47, в виде таблицы 8 или аппроксимирующих зависимостей [26], [36]:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= A_1 \cdot \lambda + A_0 \\ A_1 &= -0,496 \cdot \alpha^3 + 1,826 \cdot \alpha^2 - 2,461 \cdot \alpha + 0,473. \\ A_0 &= 0,161 \cdot \alpha^3 - 0,342 \cdot \alpha^2 - 0,1 \cdot \alpha + 2,93 \end{aligned} \quad (7)$$

Расчёт коэффициента k_i при различных параметрах фазового регулирования (угол α открытия тиристорov, коэффициент мощности $\cos \varphi$ и угол λ проводимости тиристорov) может быть выполнен по известной формуле [36], где φ , α и λ - в радианах:

$$k_i = \frac{I_2}{I_{2i}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin \lambda}{\pi \cos \varphi} \cos(2\alpha + \varphi + \lambda)}. \quad (8)$$

Таблица 8 – Длительность импульса сварочного тока λ для различных значений α и $\cos \varphi$ [36]

$\cos \varphi$	Угол включения тиристоров α , град. эл.											
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
0,1	-	-	-	-	180	170	152	134	116	97	78	59
0,2	-	-	-	-	178	162	146	129	112	94	76	58
0,3	-	-	-	-	170	155	140	125	109	92	75	57
0,4	-	-	-	175	163	149	135	120	105	89	73	56
0,5	-	-	-	168	156	143	130	116	102	87	71	55
0,6	-	-	172	161	149	137	125	112	98	84	69	54
0,7	-	175	165	154	143	131	120	107	95	81	67	52
0,8	177	167	156	146	135	124	113	102	90	77	64	50
0,9	166	156	146	136	125	115	105	94	83	72	60	47

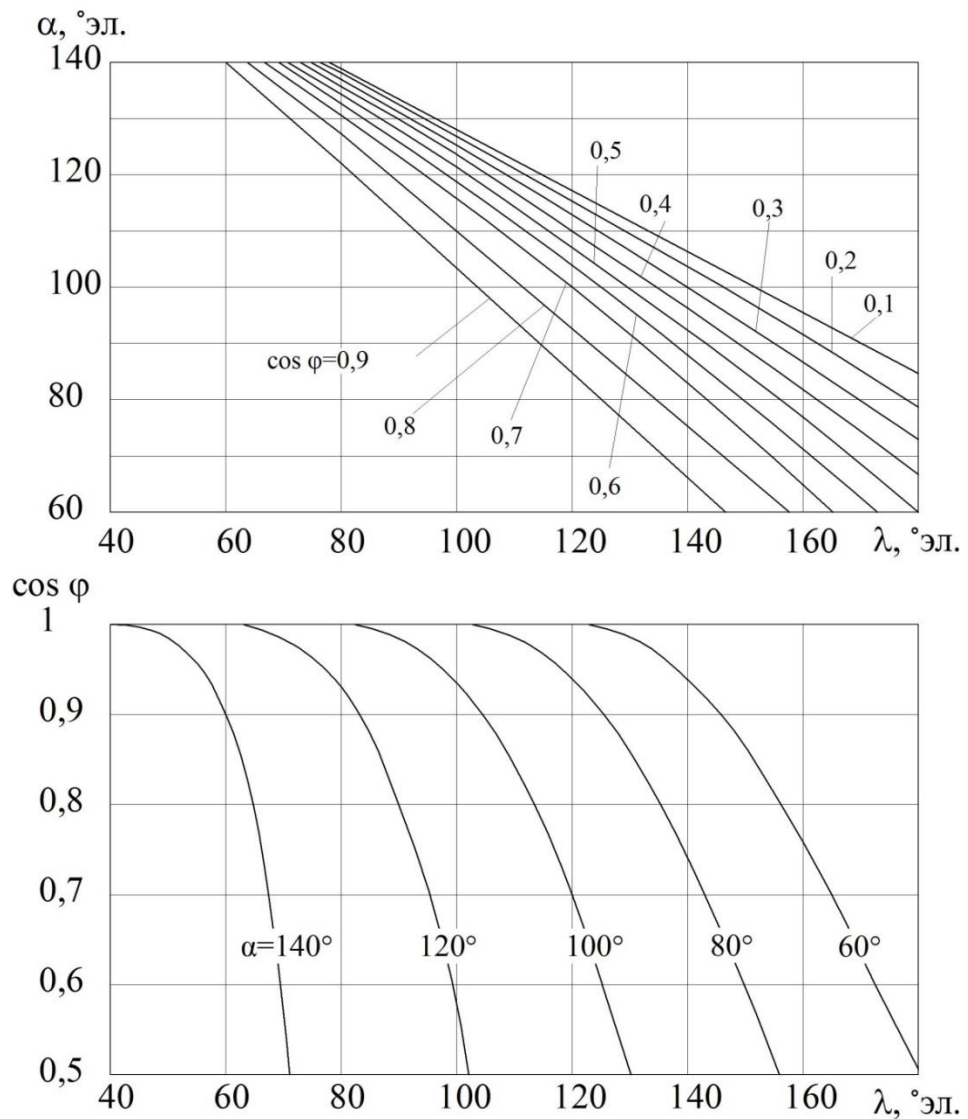


Рисунок 47 – Величина коэффициента мощности $\cos \varphi$ при различных параметрах фазового регулирования α и λ [26]

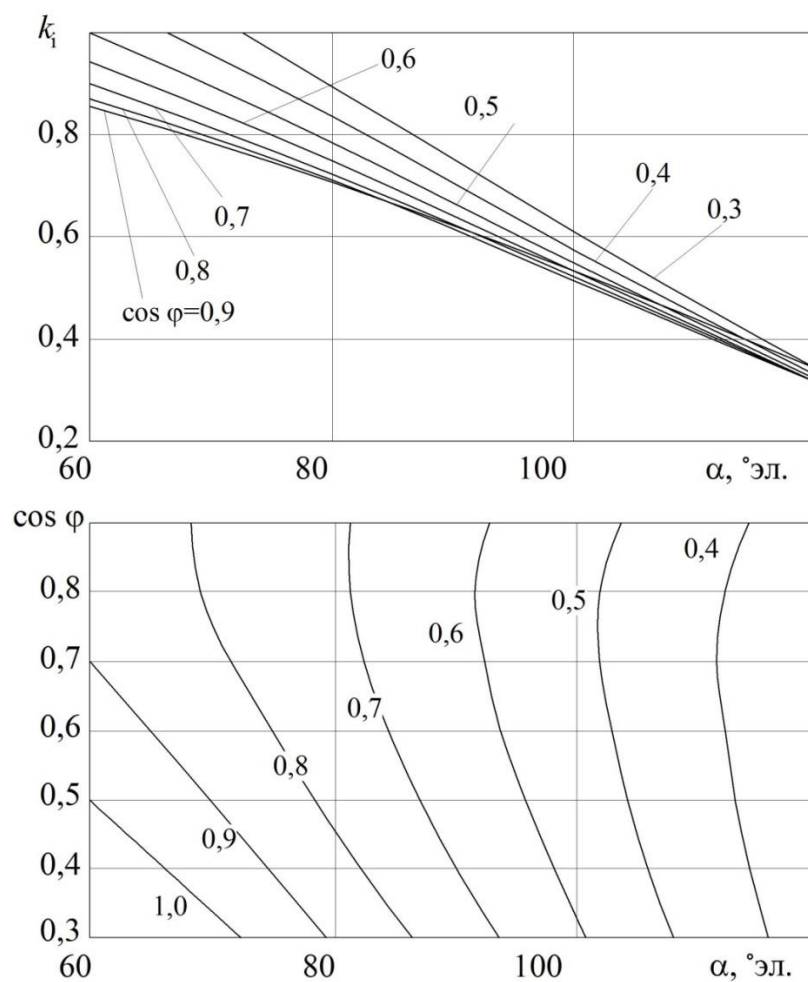


Рисунок 48 – Графическое представление коэффициента регулирования k_i сварочного тока при различных параметрах фазового регулирования

Таблица 9 – Значение коэффициента регулирования k_i сварочного тока в зависимости от $\cos \varphi$ и угла открытия тиристоров α [36]

$\cos \varphi$	Угол открытия тиристоров $\alpha, \dots^\circ \text{эл.}$											
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
0,1	-	-	-	-	-	0,89	0,71	0,54	0,39	0,26	0,15	0,077
0,2	-	-	-	-	0,97	0,81	0,65	0,50	0,36	0,24	0,15	0,075
0,3	-	-	-	-	0,89	0,75	0,61	0,47	0,34	0,23	0,14	0,073
0,4	-	-	-	0,96	0,83	0,70	0,57	0,45	0,33	0,23	0,14	0,073
0,5	-	-	-	0,90	0,79	0,67	0,55	0,43	0,32	0,22	0,14	0,074
0,6	-	-	0,94	0,85	0,75	0,64	0,53	0,42	0,32	0,22	0,14	0,075
0,7	-	0,97	0,90	0,82	0,72	0,62	0,52	0,42	0,32	0,22	0,14	0,078
0,8	0,99	0,94	0,87	0,80	0,71	0,62	0,52	0,42	0,32	0,23	0,15	0,084
0,9	0,96	0,91	0,86	0,79	0,71	0,62	0,53	0,44	0,34	0,25	0,17	0,096

Результаты численного решения уравнения (8) могут быть представлены графически в виде номограммы на рисунке 48, в виде таблицы 9 или аппроксимирующих зависимостей [26], [36]:

$$\begin{aligned}
k_i &= B_1 \cdot \alpha + B_0 \\
B_1 &= -0,519 \cdot \cos^2 \varphi + 1,086 \cdot \cos \varphi - 1,076, \\
B_0 &= 1,337 \cdot \cos^2 \varphi - 2,587 \cdot \cos \varphi + 2,667
\end{aligned}
\tag{9}$$

где α - в радианах.

Таким образом, расчётное определение коэффициента регулирования k_i сварочного тока может быть выполнено по результатам анализ осциллограмм тока и напряжения.

3.4 Вычисление регулировочной характеристики $k_i \cos \varphi$

Расчётное определение активного сопротивления $R_{2к}$ контактной машины в режиме короткого замыкания по результатам опыта короткого замыкания в условиях фазового регулирования с использованием формулы (5) предполагает измерение сетевого напряжения U_c , тока $I_{2к}$ во вторичном контуре, угла λ проводимости тиристоров при известных (заданных) коэффициенте трансформации K_T и угле α открытия тиристоров. Далее по аппроксимирующей зависимости (7) вычисляется коэффициент мощности $\cos \varphi$, а по зависимости (9) – коэффициент регулирования k_i .

Расчёты значений величин $\cos \varphi$ и k_i согласно (7) и (9), а также по предложенным другими авторами [5], [6], [7], [22], [39] аппроксимирующим зависимостям характеризуются существенными погрешностями.

Поскольку в формуле (5) используется произведение величин $\cos \varphi$ и k_i , а при расчётном определении активного сопротивления $R_{2к}$ значения $\cos \varphi$ и k_i отдельно друг от друга не применяются, то представляется рациональным предложение авторов [28] аппроксимировать сразу произведение величин $\cos \varphi$ и k_i , как показано на рисунке 49:

$$k_i \cos \varphi = -0,45\lambda - 0,94\alpha + 2,93, \tag{10}$$

где α и λ – в радианах.

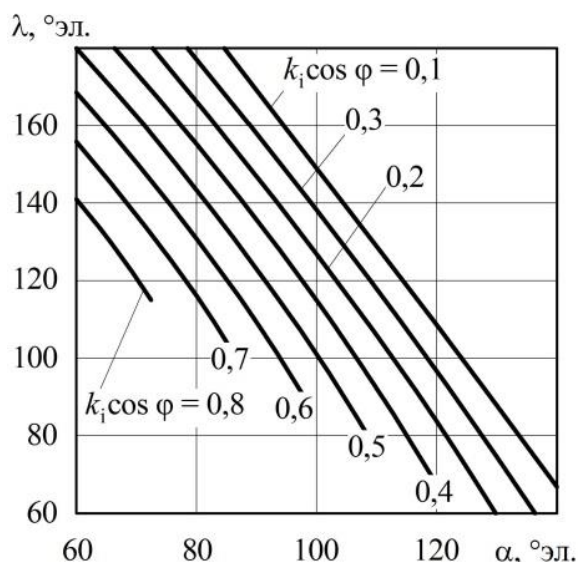


Рисунок 49 – Диаграмма расчётных согласно (3.5) и (3.7) значений регулировочной характеристики $k_i \cos \varphi$ для различных параметров фазового регулирования

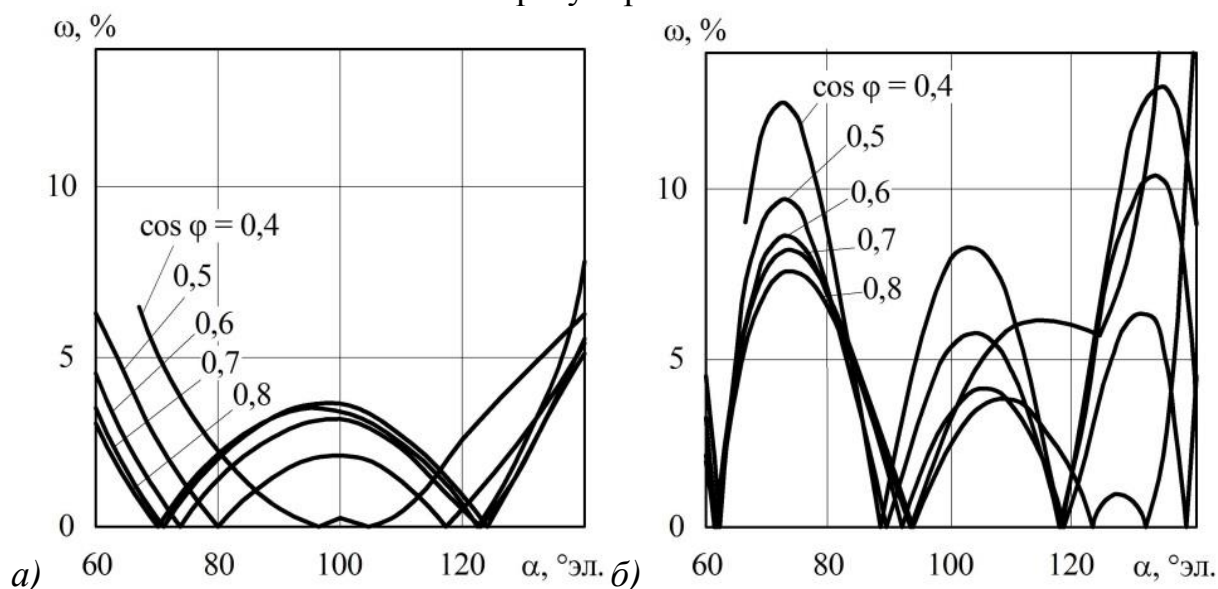


Рисунок 50 – Погрешность вычисления $k_i \cos \varphi$ по предлагаемой зависимости (3.9) (а) и ранее используемым зависимостям (3.6) и (3.8) (б)

Вычисление регулировочной характеристики $k_i \cos \varphi$ по (10) происходит со значительно меньшими погрешностями, что демонстрируется рисунком 50-а, чем при вычислениях по ранее используемым алгоритмам (7) и (8), согласно рисунка 50-б.

3.5 Методика оценки состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин

Для оценки состояния вторичных контуров многоэлектродных машин (расчётное определение активного сопротивления $R_{2к}$ контактной машины в режиме короткого замыкания) выполняют следующие действия.

Перед проведением эксперимента определяют коэффициент трансформации K_T (по технической документации на сварочную машину или проведение опыта холостого хода).

Обеспечивают последовательное сжатие сварочных электродов каждой электродной группы путём подачи соответствующего управляющего сигнала на пневматические распределители.

Устанавливают заданный угол открытия сварочных тиристоров $\alpha = 80^\circ \text{эл.}$

После сжатия электродов подают команду на тиристоры на включение тока. Длительность импульса тока $t_{св} = 0,1 \text{ с}$ (пять периодов сетевого напряжения). При этом первые три периода служат для приработки электродов, в течение этих периодов сопротивление участка «электрод-электрод» снижается до нуля и перестаёт оказывать существенное влияние на точность расчётного определения величины $R_{2к}$. Четвёртый период служит для измерения. Пятый период является резервным, и может быть использован для проверки измерений в четвёртом периоде в случае возникновения спорных ситуаций, как представлено на рисунке 51.

В четвёртом периоде сетевого напряжения измеряют сетевое напряжение U_c , вторичный ток $I_{2к}$ и длительность и угол λ проводимости тиристоров.

С учётом формулы (10) вычисляют значение регулировочной характеристики $k_i \cos \varphi$ для $\alpha = 80^\circ \text{эл.}$ как

$$k_i \cos \varphi = -0,450\lambda + 1,619. \quad (11)$$

Вычисляют активное сопротивление $R_{2к}$ контактной машины, которое для $\alpha = 80^\circ$ эл. согласно (5) и (11) вычисляется как:

$$R_{2к} = \frac{U_c(-0,45\lambda + 1,619)}{I_{2к} \cdot K_T}, \quad (12)$$

где λ – в радианах.

Предлагаемая методика расчётного определения активного сопротивления $R_{2к}$ контактной машины в режиме короткого замыкания была успешно апробирована на втором посту многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.651.421. Нижняя оснастка, представленная на рисунке 52-а, включает в себя ложементы 1 и прижимы 2 для фиксации свариваемых деталей, контрэлектродные плиты с электродами 3 и фальшь-электродами 4. Верхняя оснастка, представленная на рисунке 52-б, включает в себя узлы подачи сварочных клещей 5 и пистолетов 6.

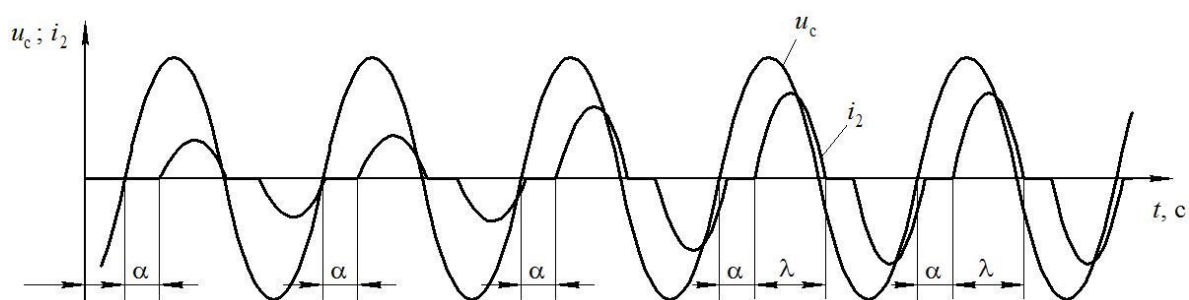


Рисунок 51 Осциллограммы тока и напряжения при проведении опыта короткого замыкания контактных машин

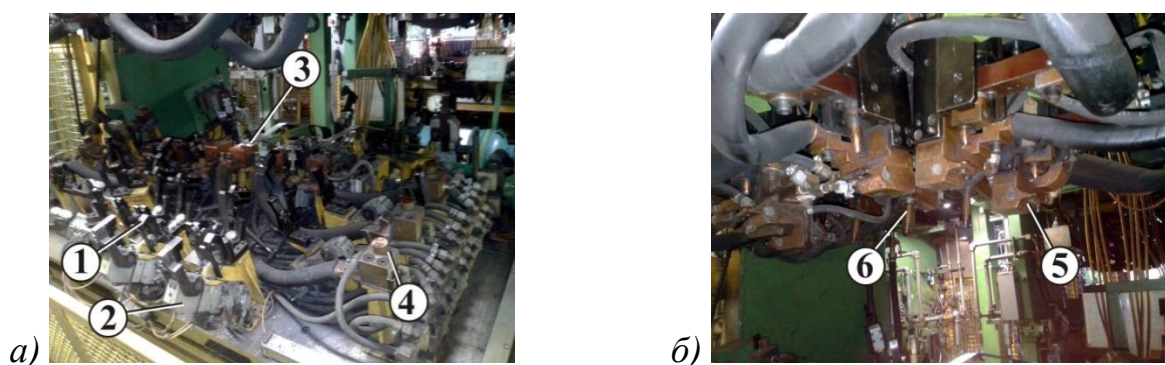


Рисунок 52 – Верхняя (а) и нижняя (б) оснастки сварочной машины МСМ 503.651.421

Вторичный контур рассматриваемой многоэлектродной сварочной машины включает несколько сварочных групп согласно таблице 10. Генерация сварочного тока происходит от двух трансформаторов. К первому трансформатору подключено три сварочных пистолета и одни сварочные клещи. Ко второму трансформатору подключено три сварочных пистолета и двое сварочных клещей. В процессе сварки осуществляется поочерёдное сжатие сварочных пистолетов и клещей и последовательная простановка девяти сварных точек.

Таблица 10 – Состав вторичного контура второго поста многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.651.421

№ трансформатора	№№ сварочных пистолетов	№№ сварочных клещей	Количество точек
1	П.1, П.2, П.3	Кл.1	4
2	П.4, П.5, П.6	Кл.2, Кл.3	5

Выполняли последовательное сжатие электродов и включение тока на клещах и пистолетах каждой сварочной группы с углом открытия тиристорov $\alpha = 80^\circ$ эл. При помощи регистратора РКДП-0401 (производства ЗАО «ЭЛЕКТРИК МИКС») [48] выполняли измерения напряжения U_c питающей сети, тока I_2 во вторичном контуре и угла λ проводимости тиристорov. Согласно (12) вычисляли величину активного сопротивления $R_{2к}$, результаты представлены в таблице 11. Как показали полученные результаты, расчётное значение активного сопротивления $R_{2к}$ коррелирует с измеренным при помощи микроомметра МО-01 (производства ООО «Импульс») омическим сопротивлением $R_{Ом}$.

Многоэлектродная машина МСМ 503.651.421 интенсивно эксплуатировалась в течение восьми недель, за этот периода на ней было сварено сто тыс. деталей. В течение всего времени каждую неделю повторяли описанный выше опыт короткого замыкания, по результатам которого отслеживали величину активного сопротивления $R_{2к}$ для каждой электродной группы. За указанный период времени произошёл выход из строя гибких

неохлаждаемых перемычек в цепи сварочных пистолетов № 4 и № 5, сварочных клещей № 1 и № 2, что представлено на рисунке 53.

Таблица 11 – Результаты опыта короткого замыкания и расчёт $R_{2к}$ и $X_{2к}$ на машине МСМ 503.651.421

№ пистолета/клещей	П.1	П.2	П.3	П.4	П.5	П.6	Кл.1	Кл.2	Кл.3
U_c , В	377	367	369	363	369	366	361	350	357
I_2 , кА	6980	6390	5710	4530	5550	7260	6170	5300	6430
λ , °эл.	153	151,5	153,5	148,5	156	155	154	153	154
$R_{2к}$, мкОм по (3.11)	452	496	536	734	522	404	480	553	455
$R_{2к}$, мкОм по (3.4), (3.5) и (3.7)	449	491	532	723	522	404	477	549	453
ω , %	0,7	1,0	0,6	1,5	0	0,2	0,5	0,7	0,5
$R_{Ом}$, мкОм	258	280	317	410	307	284	271	324	265

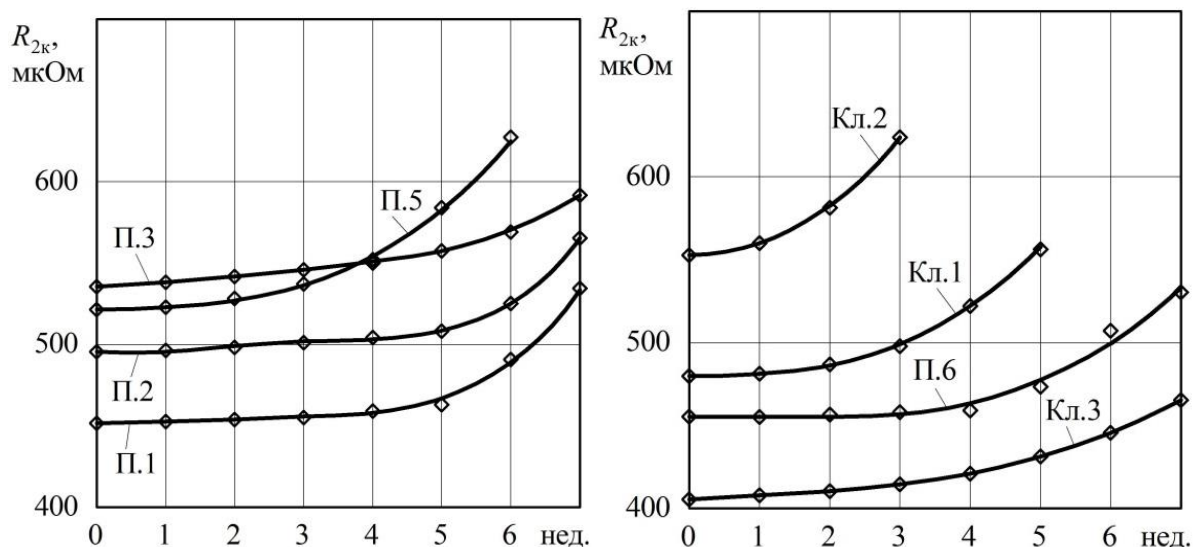


Рисунок 53 – Динамика изменения активного сопротивления $R_{2к}$ сварочных групп при продолжительной работе

В процессе интенсивной работы гибкие перемычки вторичных контуров испытывают механические знакопеременные и токовые нагрузки, в результате которых происходит их частичное разрушение. Также происходит загрязнение и ослабление крепления элементов вторичного контура. В результате этого наблюдается увеличение активного сопротивления отдельных элементов вторичного контура и всего контура в целом. Как показывают результаты проведённых исследований, представленные на

рисунке 53, износ элементов вторичного контура и увеличение его активного сопротивления $R_{2к}$ не пропорциональны количеству сварок. По мере выработки ресурса гибкой перемычки скорость износа (и роста сопротивления $R_{2к}$) увеличивается, достигая максимума в момент разрушения. На основании этого можно сделать вывод, что существует «пограничное состояние», после достижения которого дальнейшая эксплуатация гибкой перемычки нерациональна.

Вторичный контур включает в себя несколько перемычек, износ которых происходит с различной скоростью. Поэтому не представляется возможным вычленивать вклад каждой перемычки в величину активного сопротивления $R_{2к}$ вторичного контура. Тем не менее, при переходе одного из элементов контура в «пограничное состояние», близкое к разрушению, отслеживается по скачку роста величины $R_{2к}$. В случае измерений на многоэлектродной сварочной машине МСМ 503.651.421 происходит интенсивный износ гибких перемычек сечением 300 мм², для которых может быть признан критическим рост сопротивления $R_{2к}$ на 40 мкОм в неделю. Так, по результатам измерений было прогнозировано скорое разрушение перемычек в цепи сварочных пистолетов № 1 и № 2, что и произошло на следующей неделе после прекращения измерений.

Выводы по третьему разделу

Оценка состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин путём измерения их омического сопротивления при помощи микроомметра, применяемая в настоящее время в массовом производстве, может быть признана утомительной и трудоёмкой процедурой, осуществление которой требует остановки автоматической линии на длительный срок.

Оперативную оценку состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин предложено выполнять по величине активного сопротивления $R_{2к}$ в режиме короткого замыкания. Расчёт этой величины

предложено проводить по результатам опыта короткого замыкания, предусматривающего включение контактной машины с сомкнутыми электродами, измерение сетевого напряжения U_c , вторичного тока $I_{2к}$ и угла проводимости λ тиристоров.

Для вычисления активного сопротивления $R_{2к}$ в условиях фазового регулирования сварочного тока предложено использовать регулировочную характеристику $k_i \cos \varphi$, которая может быть аппроксимирована с высокой точностью в зависимости от параметров фазового регулирования (угла открытия тиристоров α и угла проводимости тиристоров λ).

Включение контактной машины в режиме короткого замыкания для расчётного определения активного сопротивления $R_{2к}$ целесообразно выполнять при угле открытия тиристоров $\alpha = 80^\circ$ эл., для которого величина $k_i \cos \varphi$ с высокой точностью может быть аппроксимирована как $k_i \cos \varphi = -0,450\lambda + 1,619$.

Оценка необходимости замены элементов вторичного контура может быть выполнена по отслеживанию его перехода в «пограничное состояние», характеризующееся ростом увеличения $R_{2к}$, которое для гибких перемычек сечением 300 мм^2 составляет 40 мкОм в неделю.

Заключение

В диссертационном исследовании поставлена цель - повышение стабильности качества контактной сварки путём разработки методик диагностики состояния многоэлектродных машин и синтеза новых алгоритмов управления.

Ужесточение требований к сварным соединениям, применение новых материалов, переход на высокопроизводительные режимы и сокращение объёмов разрушающего контроля делают актуальными исследования в области управления сварочными процессами и контроля состояния сварочного оборудования. Принятая нормативная документация, методики контроля и способы управления процессом сварки не позволяют получить стабильного качества соединений в условиях действия возмущений, характерных для массового производства.

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать задачи диссертационного исследования.

Первая задача – выполнить оценку возмущений, действие которых на процесс контактной сварки наиболее пагубно сказывается на стабильности качества в условиях массового производства. Вторая задача – оценить возможности современной аппаратуры управления по компенсации выявленных возмущений. Третья задача – предложить методику оперативно оценки состояния контактных сварочных машин в условиях массового производства. Четвёртая задача – апробировать предлагаемые решения и сделать выводы по целесообразности их внедрения в массовое производство.

В ходе решения первой задачи были сформулированы затруднения контактной сварки в условиях массового производства, снижающие стабильность качества соединений: колебания напряжения питающей сети, износ сварочных электродов, низкая стабильность сварочного усилия, интенсивный износ элементов вторичного контура, проблемы размещения датчиков тока во вторичном контуре.

В ходе решения второй задачи установлено, что в случае интенсивного износа электродов стабилизация сварочного тока не может в полной мере обеспечить стабильное качество выполняемых соединений даже при ступенчатом управлении током. Повышение эффективности систем управления сварочным током должно быть основано на оперативной оценке состояния сварочных электродов по результатам измерения сопротивления между электродами.

В ходе решения третьей задачи предложено оперативную оценку состояния вторичных контуров многоэлектродных сварочных машин предложено выполнять по величине активного сопротивления в режиме короткого замыкания. Расчёт этой величины предложено проводить по результатам опыта короткого замыкания, предусматривающего включение контактной машины с сомкнутыми электродами, измерение сетевого напряжения, вторичного тока и угла проводимости тиристоров.

В ходе решения четвёртой задачи предлагаемая методика расчётного определения активного сопротивления контактной машины в режиме короткого замыкания была успешно апробирована на втором посту многоэлектродной сварочной машины МСМ 503.651.421.

Таким образом, проведённые исследования позволяют повысить эффективность управления контактной сваркой и диагностики состояния сварочного оборудования. На основании вышеизложенного цель диссертационного исследования может считаться достигнутой.

Внедрение результатов проведённых исследовательских работ в массовом производстве позволит повысить стабильность качества контактной сварки и снизить трудоёмкость диагностики состояния сварочного оборудования.

Дальнейшие исследования должны проводиться в направлении разработки методик диагностики сварки и назначения оптимальных параметров режима с использованием полученных в диссертационном исследовании результатов.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Аксельрод Д. Ф., Иоффе Ю. Е, Куперман М. Н. Микропроцессорные контроллеры для машин контактной сварки // Сварочное производство. 1990. № 8. С. 7–8.
2. Анциборов А. Н., Климов А. С., Климов В. С., Кудинов А. К. Управление контактной сваркой в условиях возмущений // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 43–45.
3. Анциборов А. Н., Комиренко А. В. Физическое моделирование контактной сварки // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы II международной заочной научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. № 2. С. 88–91.
4. 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; Оpubл. 07.10.83, Бюл. № 37.
5. А.с. № 1281358 СССР, МПК4 В 23 К 11/24. Способ определения коэффициента мощности полнофазного включения тока при контактной точечной сварке однофазным током / Ф.А. Аксельрод, У.У. Ибрагимов, Ю.Е. Иоффе [и др.]; Заявл. 14.01.85; Оpubл. 07.01.87.
6. А.с. № 1310149 СССР, МПК4 В 23 К 11/24. Способ измерения коэффициента мощности однофазной контактной сварочной машины / Н.В. Подола, П.М. Руденко, В.С. Шавриш и В.И. Гейц; Заявл. 13.01.86; Оpubл. 15.05.87. Бюл. №18.
7. А.с. № 1816603 СССР, МПК В23К 11/24. Способ контроля активного сопротивления сварочного контура при контактной сварке / Ю.Е. Иоффе, Б.Н. Резников, В.И. Повстан [и др.]. Заявл. 23.01.90; Оpubл. 23.05.93 // Б.И. 1993. № 19.

8. А.с. № 1816604 СССР, МПК В23К 11/24. Способ контроля и управления процессом контактной сварки / В.П. Сидоров, С.М. Абросимов. Заявл. 25.01.91; Опубл. 23.05.93 // Б.И. 1993. № 19.

9. Быковский А. Г., Горбунов А. Л. Математическое моделирование теплового состояния металла при контактной точечной сварке // Сварочное производство. 1990. № 6. С. 36–38.

10. Вакатов А. В. Особенности формирования сварных соединений при контактной точечной сварке оцинкованной стали // Сварочное производство. 2001. № 2. С. 20-21.

11. Высоковский Е. С., Лапинский Л. Ф., Циринский Г. С., Приходченко Ю. Н. Автоматическая предупредительная коррекция режима сварки при износе электродов контактных машин // Сварочное производство. 1975. № 5. С. 29–31.

12. Высоковский Е. С., Лапинский Л. Ф. Экспериментально исследование безотказности электродов точечных контактных машин // Сварочной производство. 1971. № 10. С. 1–3.

13. Гельман, А. С. Контактная электросварка. М.: Машгиз, 1949. 496 с.

14. Гиллевич В. А., Шиндер Э. А. Особенности образования соединения при точечной сварке оцинкованной стали // Автоматическая сварка. 1973. № 8. С. 18–21.

15. ГОСТ 15878-79. Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры. М.: Издательство стандартов, 1979. 9 с.

16. Золотарев Б. Б. Деформации при точечной и шовной сварке и их устранение. М.: Машиностроение, 1975. 39 с.

17. И 04000.37.101.129. Инструкция. Контроль качества деталей и узлов кузова. ОАО «АВТОВАЗ», 2014. 48 с.

18. И 14273:2000. Инструкция. Размеры образца и методика испытания на срез для сварных швов, полученных при контактной точечной, рельефной и роликовой сварке. ОАО «АВТОВАЗ», 2000. 14 с.

19. Исаев А. П., Вербицкий В. П., Херольд Х. Методика моделирования пневмопривода и несущей конструкции машины для точечной контактной сварки // Сварочное производство. 2006. № 3. С. 18–25.

20. Иоффе Ю. Е., Жданов В. В., Котов А. В. Новые разработки ЗАО «Электрик–МИКС» в области контроля и управления сварочными процессами // Сварочное производство. 2002. № 4. С. 39–43.

21. Картавин Ю. А., Гуляев В. А. Влияние состояния гибкого кабеля вторичного контура подвесных точечных машин на его сопротивление и сварочный ток // Сварочное производство. 1974. № 4. С. 29–30.

22. Климов, А. С., Герасимов А. А., Анциборов А. Н., Гончаров М. С. Расчётное определение коэффициента мощности контактной сварочной машины при осуществлении автоматического управления процессом сварки // Проблемы машиностроения и автоматизации. № 1. 2006. С. 85–88.

23. Климов А. С., Герасимов А. А., Анциборов А.Н., Гончаров М.С. Способ измерения параметров тепловыделения при контактной точечной сварке на однофазных машинах переменного тока // Сварочное производство. 2006. № 11. С. 18–21.

24. Климов А. С., Комиренко А. В., Анциборов А.Н., Климов В. С. Параметрическая стабилизация контактной сварки // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 104–109.

25. Климов А. С., Кудинов А. К., Герасимов А. А., Анциборов А. Н. Продолжительность включенного состояния тиристорov как параметр обратной связи в системах автоматического управления контактной точечной сваркой // Сварочное производство. 2009. № 2. С. 17–22.

26. Климов А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 216 с.

27. Климов А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 216 с.

28. Климов В. С., Климов А. С., Кудинов А. К. Диагностика контактной точечной сварки с использованием нейронной сети Хемминга. Часть. 1.

Измерение сварочного сопротивления // Вестник машиностроения, 2016. № 10. С. 42–47.

29. Комиренко А. В., Климов А. С., Климов В. С., Анциборов А. Н. Микропроцессорное управление контактной сваркой // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 9. С. 3–10.

30. Кочергин, К. А. Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.

31. Куликов В. П. Выплески и несплошности соединений при контактной точечной сварке // Сварочные технологии и оборудование. 2005. № 2. С. 4–6.

32. Куликов В. П. Непровары при контактной сварке // Сварочные технологии и оборудование. 2005. № 1. С. 4–11.

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

34. Махненко В. И., Скосягин Ю. А., Великоиваненко Е. А. Моделирование деформационных процессов при компьютерном проектировании технологии точечной контактной сварки // Автоматическая сварка. 1994. № 2. С. 23–26.

35. Меньшиков Г. А., Редчиц В. В., Фролов В. А. Тепловые процессы при точечной контактной сварке титановых сплавов // Сварочное производство. 2003. № 11. С. 21–26.

36. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова. СПб: Энергоатомиздат, 2000. 848 с.

37. Орлов Б. Д., Чулошников П. Л., Верденский В. Б., Марченко А. Л. Контроль точечной и роликовой электросварки // М.: Машиностроение, 1973. 304 с.

38. 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.

39. Патент № 4289951 США, МПК3 В 23 К 11/24. Power factor monitoring and control system for resistance welding with line disturbance immunity / Dennis J. Jurek; Заявл. 16.02.79; Опубл. 15.09.81.

40. Патент № 4493040 США, МПК G06G 7/64, В23К 11/24. Apparatus and method of phase control for resistance welding and other resistive–inductive loads / Peter W. Vanderhelst. Заявл. 01.06.82; Опубл. 08.01.85.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. Патент № 61078579 Япония, МПК4 В 23 К 11/24. Controlling method for spot welding / Okabe Yoshio, Koyakata Masato; Заявл. 21.09.84; Опубл. 22.04.86.

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

46. Поляков А. Ю., Фурманов С. М., Федотов Б. В. Экспериментальное определение энергетических параметров процесса контактной рельефной сварки // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. № 1. С. 74–84.

47. Прохоров А. Н., Чакалев А. А., Юрин О. Г. Математическая модель процесса контактной точечной сварки // Сварочное производство. 1991. № 4. С. 39–42.

48. Регистратор сварочных процессов РКДП-0401: паспорт КПБШ.411711.002 ПС // СПб.: ЗАО «Электрик–МИКС», 2007. 34 с.
49. Регуляторы контактной сварки микропроцессорные РКМ–803УХЛ4 и РКМ–803–1УХЛ4 : паспорт / ЗАО «Электрик–МИКС», С.–Петербург. – 2001. – 36 с.
50. Руденко П. М., Гавриш В. С. Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02 // Автоматическая сварка. 2007. № 11. С. 43–45.
51. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. / Редкол.: В.А. Николаев (пред.) [и др.]. Т. 3 / Под ред. В.А. Винокурова. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
52. Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. Электроды для контактной сварки // Л.: Машиностроение, 1972. 96 с.
53. Стандарт Renault 01-50-912/С. Контактная точечная сварка. Renault, 2005. 31 с.
54. Судник В. А., Ерофеев В. А. Расчёты сварочных процессов на ЭВМ. Тула: ТПИ, 1986. 100 с.
55. Судник В. А., Ерофеев В. А., Кудинов Р. А. Имитация контактной точечной сварки с помощью программного обеспечения SPOTSIM // Сварочное производство. 1998. № 8. С. 3–8.
56. ТУ 3548-196-00232934-2004. Перемычки кабельные гибкие. – Введ. 2005-02-15. – Тольятти: ОАО «АВТОВАЗ», 2004. – 18 с.
57. ТУ 37.101.066-80. Жилы токопроводящие медные круглые сварочных кабелей. – Введ. 1980-09-01. – Тольятти: ВАЗ, 1980. – 22 с.
58. Чакалев А. А., Прохоров А. Н. Совершенствование термомодеформационной модели контактной точечной сварки // Сварочное производство. 1989. № 4. С. 29–32.
59. Чулошников П. Л. Контактная сварка М.: Машиностроение, 1987. 176 с.

60. Чулошников П.Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов М.: Машиностроение, 1974. 232 с.
61. Чулошников П. Л., Татаринцев А. В., Казаков С. М. Анализ перемещений электродов машины и деталей в процессе точечной сварки // Сварочное производство. 1985. № 6. С. 21–23.
62. Шаповалов, Е. В., Галаган Е. В., Клишар Ф. С. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2013. № 1. С. 10–21.
63. Шереверов В. И., Бухтин С. А., Лившиц А. Г. Серийный микропроцессорный контроллер контактной сварки ККС–01 // Сварочное производство. 1988. № 11. С. 23–24.
64. Шелег В. К., Цумарев Ю. А., Цумарев Е. Н. Влияние шунтирования тока при контактной точечной сварке на диаметр сварной точки // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 57–58.
65. ISO 14273:2000. Размеры образца и методика испытания на срез для сварных швов, полученных при контактной точечной, рельефной и роликовой сварке.
66. Cho H. S., Cho Y. J. A study of the thermal behavior in resistance spot welds // Welding Journal. 1989. № 6. P. 236–244.
67. Dorn L., Xu P. Influence of the mechanical properties of resistance welding machines on the quality of spot welding // Schweißen und Schneiden. 1993. № 1. P. 2–14.
68. Resistance Welding Manual (Fourth Edition) / Resistance Welder Manufacturers Association, Philadelphia, 1989. 502 p.
69. Richard A. A., Traub A. C., Vanzetti R. Real-time control of nugget formation in spot welds // Euromicro Newsletter. 1980. Vol. 6. P. 296–303.
70. Sudnik W., Dilthey U., Bohlmann H., Erofeew W. SPOTSIM: Modellierung und numerische Simulation des Widerstandspunktschweißens mit

experimenteller Verifikation // Deutscher Verlag für Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS–Berichte,1998. P. 116–121.

71. Tang H., Hou W., Hu S. J. Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality // Welding Journal. 2003. № 5. P. 116–124.

72. Tsai C. L., Jammal O. A., Papritan J. C., Dickinson D. W. Modeling of Resistance Spot Welding Nugget Growth // Welding Journal. 1992. № 2. P. 47–54.

73. Zhou M., Zhang H., Hu S. J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds // Welding Journal. 2003. № 4. P. 72–77.